

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Freie Forschung mit gebundenen Händen?

Mehr war wohl nicht drin in der Gemengelage aus Forschungszielen, Theologie und Juristerei, weniger aber schon: Ende Januar votierte der Bundestag dafür, dass bereits existierende Linien embryonaler Stammzellen unter strengen Auflagen importiert und erforscht werden dürfen. Den Import soll nach dem Gesetzentwurf eine Behörde regeln, die von einer Ethik-Kommission beraten wird.

Ob das für Deutschlands Zellforscher nun eine gute oder schlechte Nachricht war, wird sich weisen. Mehrere Punkte bleiben jedenfalls im Gedächtnis:

➤ **Die Debatte:** Viele beklagten, die Diskussion habe zu lange gedauert. Aber es ging eben um mehr als etwa die Entwicklung des Mikrochips der nächsten Generation. Hier kollidierten Grundsatzfragen zur Definition und Verfügbarkeit menschlichen Lebens sowohl mit ehrgeizigen Zielen der Medizin als auch mit der grundsätzlichen Forschungsfreiheit. Dies abzuwägen ging nicht im Hauruckverfahren.

➤ **Stichtagsregelung:** Zahlreiche der zum geplanten Stichtag 1.1.2002 existierenden Stammzell-Linien (nur solche sollen importiert werden dürfen) haben vermutlich keine für Forschungen ausreichende Qualität. Auch könnten sie mit so genannten Retroviren aus Mäusezellen infiziert sein,

» Beim Schutz der Moral könnte die Moral auf der Strecke bleiben. «

mit denen sie zur Wachstumshilfe in Kontakt gebracht wurden. Für einen Einsatz am Menschen bedarf es womöglich neuer Zelllinien, zu denen dann Forscher hierzulande keinen Zugang hätten. Das muss zwar keinen Wissenschaftlerexodus aus Deutschland auslösen. Nationale Spitzenleistungen fördert es aber auch nicht gerade.

➤ **Nationaler Alleingang:** Der jetzt mehrheitlich erzielte Konsens zum Stammzellen-Import düpiert unsere europäischen Nachbarn. Großbritannien beispielsweise erlaubt zum therapeutischen Klonen die Verwendung von Embryonen bis zur Einnistung, also etwa bis zehn Tage nach der Befruchtung. Wie steht es mit Europas Einheit – moralisch, juristisch, wissenschaftlich? Die Regelung stempelt jedenfalls Nachbarländer automatisch zu unmoralisch Handelnden. Für nationale Gesetze ist das natürlich ohne Belang, lässt aber wenig Realitätssinn für internationale Entwicklungen erkennen.

➤ **Heuchelei:** Gesetzt den Fall, in fünf oder fünfzehn Jahren erbringt die Stammzellen-Forschung erste Therapien und Medikamente zur Heilung schwerster Krankheiten. Konsequenterweise müsste deren Import verboten bleiben, da die Erkenntnisse aus unmoralischem Handeln gewonnen wurden. Ein Stammzellentherapie-Tourismus in solche Länder wäre damit erzwungen. Wer würde ihn behindern dürfen? Erfolgreich hätte man den „verwerflichen“ Teil der Forschungsarbeit dem Ausland überlassen. Beim Schutz der Moral bliebe die Moral auf der Strecke.

TITELBILD:

Die Ringe um den Planeten Saturn sehen nicht nur prächtig aus. An ihnen können die Astronomen auch das komplizierte Wechselspiel der Schwerkraft untersuchen. Die feine Struktur der Ringe wird wesentlich durch die Monde des Riesenplaneten erzeugt.

Bildquelle: Don Dixon

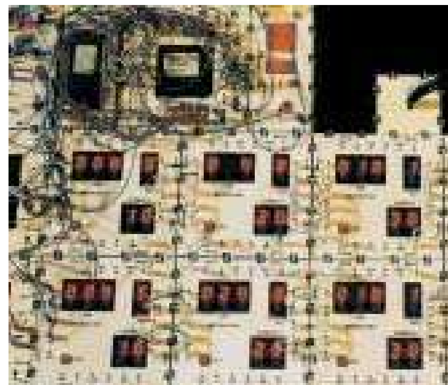
TITELTHEMA

Beringte Welten

Seite 36



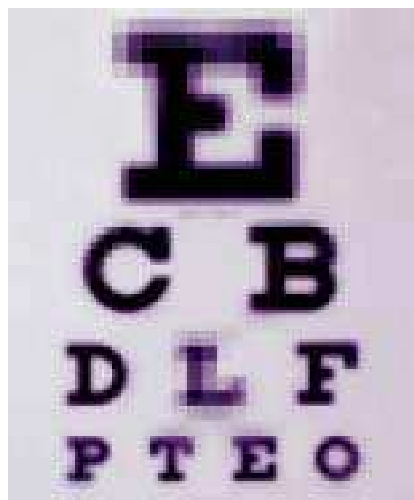
Sie sind nur wenige hundert Meter dick, aber viele zehntausend Kilometer breit: die Ringe des Saturns und der anderen Riesenplaneten. Allmählich kommen die Astronomen dahinter, welch ein komplexes Wechselspiel der Schwerkraft diese filigranen Strukturen geformt hat.



INFORMATIK Seite 26

Roboter, die sich selbst vermehren

Was Karnickeln nicht schwer fällt, scheint für künstlich hergestellte Dinge unmöglich – bislang. Computersimulationen weisen neue Wege zu Maschinen, die sich selbst fortpflanzen können.



SEHSTÖRUNGEN Seite 48

Wenn die Netzhaut verfällt

Wenn im Alter die Welt vor den Augen verschwimmt, liegt das oft an einem winzigen Defekt mitten in der Netzhaut: an einer Degeneration der so genannten Makula. Erkenntnisse über die molekularen Ursachen dieser Augenerkrankung wachsen nun rapide – und damit steigt die Hoffnung auf neue therapeutische Ansätze.



EVOLUTION DES GEISTES Seite 56

Wie der Mensch das Denken lernte

Mehr als 100 000 Jahre lang verfügten Frühmenschen offenbar über ein anatomisch modernes Gehirn, ohne es richtig zu nutzen. Erst der eher zufällige Erwerb von Sprache und damit der Fähigkeit zum abstrakten, symbolischen Denken entfaltete schlagartig die überragenden geistigen Fähigkeiten, die uns vom Rest der Tierwelt abheben.

PHOTONISCHE KRISTALLE Seite 66

Halbleiter für Lichtstrahlen



Speziell strukturierte Materialien blockieren einen bestimmten Bereich von Lichtwellenlängen. Solche „optischen Halbleiter“ versprechen vielfältige Anwendungen für Glasfasern, winzige Laser und optoelektronische Schaltkreise.

ENERGIEPOLITIK Seite 74

Die Himba und der große Damm



Um eines fragwürdigen Fortschritts willen droht die Kultur der namibischen Himba in den Fluten eines Stausees unterzugehen. Doch das Stammesvolk wehrt sich.

TECHNOSKOP Seite 86

Masse plus Klasse



Solarzellen aus der Massenproduktion leisten weit weniger als die Topmodelle der Forschungslabors. Das soll nun anders werden.

Außerdem:

➤ Sensorik: Ein Schwimmtrainer aus Silizium

➤ Nanotechnik: Lithiumakkus mit Nanoröhren

➤ Technogramm

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

REZENSIONEN

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

WEITERE RUBRIKEN

Perpetuum mobile

Physikalische Unterhaltungen – Februar 2002

In seinen Erklärungen zum Fliehkraftmotor hat Wolfgang Bürger seine Leser wohl etwas auf den Arm nehmen wollen. Oder ist hier vielleicht mit dem genannten Physik- und Ingenieurstudenten der Prüfer gleich mit durchgefallen?
Dass es die Zentrifugalkraft nicht nur, wie behauptet, in dem sich mitdrehenden Bezugssystem gibt, lässt sich jedenfalls mit einem sehr einfachen Experiment nachweisen: indem man ein Gewicht an einer Schnur um den ruhenden gestreckten Zeigefinger rotieren lässt. Spürt man da etwa keine Zentrifugalkraft?

Oder etwas theoretischer: Da die Rakete über Pendelstange und Drehlager eine Zwangskraft auf die Masse ausübt, um sie auf die Kreisbahn zu zwingen, muss die Masse umgekehrt eine Kraft auf die Rakete ausüben, eben die Zentrifugalkraft.

Dennoch wird die Rakete natürlich nicht abheben, jedoch aus einem anderen Grund: Die Kraft, mit der die Masse bei ihrer Pendelbewegung vom einen Umkehrpunkt bis zum Scheitelpunkt beschleunigt und von da bis zum anderen Umkehrpunkt abgebremst wird, hat stets eine Komponente in Richtung der Raketenachse, und zwar nach oben. Die zugehörige Reaktionskraft der Masse hat jedoch stets eine entgegengesetzt gerichtete Komponente. Auch diese muss von der Rakete aufgenommen werden, ganz gleich ob über die Federn, den Motor oder das Lager des Pendels, und sie kompensiert den schönen Vortrieb durch die Zentrifugalkraft im Zeitmittel vollständig.

Klaus D. Schomann, Frankfurt am Main

Antwort des Autors:

Die Kraft, die Sie am Zeigefinger spüren, wenn Sie eine Kugel an einer gespannten Schnur kreisen lassen, ist – im physikalischen Sprachgebrauch – keine Zentrifugalkraft. Was Sie fühlen, ist die Reaktionskraft zu den Kräften am fernen Ende der Schnur, welche die Kugel auf eine gekrümmte Bahn um den Finger zwingen. Von der Schnur losgeschnitten würde die Kugel geradeaus weiterfliegen, genauer: den übrigen vorhandenen Kräften wie Schwerkraft und Reibung folgen. So oder so ähnlich wird ein ruhender Beobachter argumentieren.

Ein Beobachter, der sich gemeinsam mit Schnur und Kugel um die Rotationsachse dreht, sieht dagegen in seinem Bezugssystem die Kugel an der Schnur ruhen. Also muss für ihn ein Gleichgewicht der Kräfte herrschen. Die Schnurkraft S und das Gewicht G der Kugel stehen offensichtlich nicht im Gleichgewicht; also muss eine Kraft hinzuerfunden werden, die das Gleichgewicht herstellt. Diese Kraft, die Zentrifugalkraft Z, zieht die Kugel nach außen. Es gibt sie nur in dem rotierenden Bezugssystem. Das am Erdboden (genauer: am Fixsternhimmel) festgemachte „Inertialsystem" kennt sie nicht.

Wenn es Zentrifugalkräfte auch in Inertialsystemen gäbe, könnten Sie auch in Frankfurt eine Stange vor sich halten und Ihr Auto durch Hin- und Herwedeln vorwärts bewegen.

Prof. Wolfgang Bürger, Karlsruhe



GRAFIK: WOLFGANG BÜRGER / THOMAS BRAUN

Die ersten geklonten menschlichen Embryonen

Januar 2002

Die Argumentation, dass „ein geklonter Organismus aus nur etwa hundert Zellen schon deshalb kein wirklicher Embryo sei, weil er nicht aus der Befruchtung eines Eis mit einem Spermium hervorgeht", ist äußerst fraglich, denn damit ist auch einem aus einem solchen „neuen Typ biologischer Einheit" eventuell entstehenden vollständigen Organismus die Zugehörigkeit zu seiner Spezies abzusprechen. Diese Ansicht taugt also nichts, denn sie verlangt zwangsläufig die Forderung nach einer „Metamorphose" der „neuen biologischen Einheit" zu einem vollwertigen Mitglied der zugehörigen Spezies im Laufe der Entwicklung. Die Festlegung dieses Umwandlungszeitpunktes ist genauso willkürlich und vom jeweils aktuellen Stand der Forschung abhängig wie bei einem normal entstandenen Embryo auch.

Dr. Andreas Fuß, Staufenberg

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-729

Gibt es ein unsichtbares Artensterben?

Januar 2002

Es ist lobenswert, dass Wayt Gibbs sich mit der allgemein vorherrschenden Sichtweise vom Artensterben als akutem Problem auf unserem Planeten kritisch auseinander setzt. Schließlich ist ja das Zweifeln und Hinterfragen des Wissenschaftlers höchste Tugend.

Doch bei seiner Auseinandersetzung mit der Argumentation der Naturschützer geht das, meiner Meinung nach, wichtigste Argument für den Schutz der Artenvielfalt in der anthropozentrischen Weltsicht des Autors vollkommen verloren. Offenbar betrachtet er uns Menschen als Kreaturen, die neben den Ökosystemen existieren und versuchen, diese auf irgendeine Art für sich zu nutzen.

Jedoch hat sich die Spezies *Homo sapiens* in ihrer Evolution, wie alle anderen Arten auch, als ein Teil der Ökosysteme entwickelt, nicht unabhängig von ihnen. Wenn wir sie durch die Ausrottung von Arten nachhaltig manipulieren, verändern wir möglicherweise auch die Ökofaktoren, die unser eigenes Leben bestimmen. Wir spielen hier mit einem hochkomplizierten System, das könnte den *Homo sapiens* möglicherweise irgendwann seine eigene ökologische Nische kosten.

Steffen Pielström, Hamburg

Bioterrorismus und die eigentliche Seuchengefahr

Editorial – Februar 2002

In der genannten Aufzählung „ … verbesserte öffentliche Hygiene, wirksamere Impfstoffe und Therapien, Kontrolle von Zwischenträgern und ein weltweites Überwachungssystem …" fehlt allerdings der entscheidendste Punkt: erschwingliche Preise für die notwendigen Medikamente.

Peter Presslein, Erlangen

Seelentests mit kleinen Fehlern

Januar 2002

Projektive Tests sind mit Einschränkung von vorneherein den Gütekriterien nicht zu unterwerfen. Sie sind nur sinnvoll anzuwenden im Rahmen einer ausführlichen therapeutischen Behandlung, wenn der Therapeut bereits viele Aspekte seines Patienten kennt.

Wird dann ein projektiver Test angewandt, ist er selbstverständlich der intersubjektiven Interpretation des Therapeuten angesichts seines Klienten unterworfen, aber er kann sehr viel beitragen zu neuen Gesichtspunkten und Ansätzen in der Therapie.

Bei diesen Tests soll der Patient Aspekte offenbaren, die ihm selbst, und in der Regel auch dem Therapeuten, nicht bewusst sind, dies im Gegensatz zu den Persönlichkeitsfragebögen. Letztere genügen in hohem Maße den Gütekriterien, liefern häufig triviale Erkenntnisse, die mit einer Frage in einem Gespräch sofort zu klären wären. Solche Fragen appellieren an das Bewusstsein des Probanden, der sich seiner Eigenschaften bewusst ist und entsprechend antwortet.

Einen projektiven Test von irgendeiner unbekannten Person zu interpretieren ist selbstverständlich Unfug und dies wird mit Einschränkung auch kein verantwortlicher Psychotherapeut machen.

Dr. Dieter Spies, Egmating

Erratum

Der Geodynamo im Labor – Februar 2002

Der atmosphärische Druck auf Seehöhe beträgt 1000 hPa (Hektopascal), wir hatten das „h“ unterschlagen.

Die Redaktion

Enkel von *Archaeopteryx*

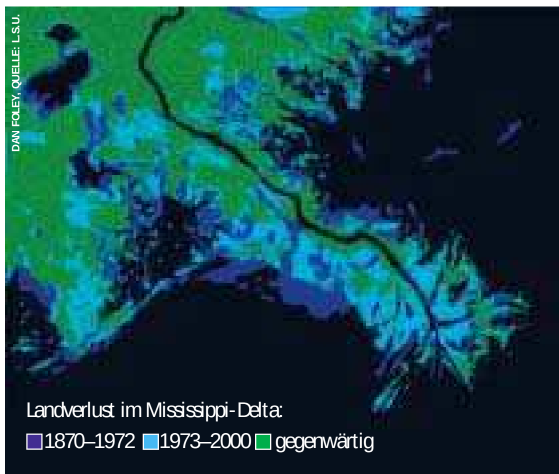
Spektrogramm – Januar 2002

Leider entspricht die künstlerische Rekonstruktionszeichnung von *Sapeornis chaoyangensis* nicht den wirklichen Verhältnissen. Zur Zeit unserer Veröffentlichung besaßen wir keine Informationen über dessen Schädel. Bei einem neu gefundenen Exemplar ist auch der Kopf erhalten geblieben und zeigt, dass er anders aufgebaut und bei weitem nicht so lang ist wie in der Rekonstruktion dargestellt.

Zhonghe Zhou, Peking

Wenn New Orleans versinkt

Januar 2002



Landverlust im Mississippi-Delta: 1870–1972, 1973–2000, gegenwärtig

Im Artikel wird beschrieben, dass das Abwasser aus den Erdkanälen regelmäßig abgepumpt wird, um bei möglichen Regenfällen Überschwemmungen vorbeugen zu können. Mit dieser Maßnahme wird aber nicht nur das Abwasser abgepumpt, sondern auch das zuströmende Grundwasser. Als Gegenmaßnahme könnten die Kanäle seitlich mit Spundwandbohlen gesichert werden. Ein direktes Nachströmen des Grundwassers wird so bei korrespondierenden Wasserspiegeln zwischen Grund- und Abwasser im Kanal vermieden.

In Deutschland ist es zum Beispiel bei größeren Bauvorhaben die Regel, dass bei Versiegelung größerer Flächen durch eine Baumaßnahme an anderer Stelle Flächen renaturiert werden müssen. Diese Renaturierung ist im Auftrag inbegriffen.

In Berlin wurde z. B. Anfang der 90er Jahre vor Beginn der umfangreichen Baumaßnahmen im Zentrum ein Grundwassergesamtkonzept erarbeitet. So wurde gefordert, dass bei einer nötigen lokalen Grundwasserabsenkung das entnommene Grundwasser in der Nähe der Absenkungsstelle wieder über Versickerungsbrunnen dem Grundwasserleiter zugeführt werden muss. Für fast alle Bauwerksgründungen wurden dichte grundwasserschonende Trogbaugruben angeordnet. Innerhalb dieser Zeit ist der Grundwasserspiegel in Zusammenwirkung mit weiteren Maßnahmen sogar leicht gestiegen.

Aus Ihrem Bericht geht nicht hervor, ob die Verantwortlichen solche oder ähnliche Maßnahmen in Erwägung ziehen, bereits geplant oder vielleicht schon ausgeführt haben. Daher ist der Artikel leider absolut unbefriedigend für mich.

Dipl.-Ing. C. Pflock, Berlin

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer (stv. Herstellerin), Andreas Merkert
Redaktionsassistenz: Cornelia Schenck, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Klaus Mohr, Tel. (0 62 21) 91 26-730
Marketing und Vertrieb: Annette Baumbusch, Anke Walter, Tel. (0 62 21) 91 26-741/744; E-Mail: marketing@spektrum.com
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Daniel Fischer, Andrea Jungbauer, Dr. Michael Scholz, Peter Schütz, Dr. Sebastian Vogel, Matthias Weiß.

Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sfr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung: Harald Müsse; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 94, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16-18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 88; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 23 ab 01.01.2002.
Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von Gruner & Jahr, Hamburg; Zeitverlag, Hamburg; VDI-Nachrichten, Düsseldorf und Wissenschaft Online, Heidelberg. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

ELEKTRONIK

Per Selbstorganisation zu Nanochips?

Chiphersteller stehen an der Schwelle zur Nanowelt. Für den Schritt hinüber bieten sich durch Selbstorganisation entstandene Nanostrukturen an. Bisher ließen sie sich nicht definiert anordnen, doch ist das nun erstmals beim Silizium gelungen.

Von Oliver G. Schmidt

Silizium bildet bekanntlich die Säule der heutigen Halbleitertechnologie. Aus ihm werden alle gängigen Computer- und Speicherchips hergestellt. Nach dem Moore'schen „Gesetz" verdoppelt sich die Integrationsdichte, also die Anzahl der Transistoren pro Fläche, alle 18 Monate. Im selben Maße müssen sich die einzelnen Bauelemente verkleinern. In ein paar Jahren dürften Transistoren deshalb nur noch einige Dutzend Nanometer (millionstel Millimeter) messen: Die Siliziumtechnologie wird in die Nanoregion vorstoßen.

Das Zauberwort in der Nanowelt heißt Selbstorganisation. Es beschreibt ein äußerst nützliches Phänomen, das in derart winzigen Dimensionen auftritt: Auf einer Oberfläche abgeschiedene Atome können sich von selbst in Sekundenschnelle zu Abermillionen von winzigen Strukturen zusammenfinden, ohne dass künstlich in das System eingegriffen werden muss. Dies eröffnet einen äußerst eleganten und einfachen Weg zur Erzeugung nanometergroßer Basisstrukturen für die Bauelemente der nächsten Chipgenerationen. Denn im Nanobereich stoßen konventionelle Methoden – wie die Lithographie und Photoätztechnik – an ihre Grenzen. Außerdem verursachen sie Fehler im kristallinen Aufbau des Halbleitermaterials, die sich umso nachteiliger auf die Funktion des Bauelements auswirken, je kleiner es ist. Durch Selbstorganisation entstehen dagegen Nanostrukturen mit perfektem Kristallgitter.

Dieser enorme Vorteil wird allerdings durch ein ebenso großes Problem wieder in Frage gestellt: Die Nanostrukturen bilden sich zwar von selbst, aber ihre Position ist weitgehend unbestimmt – sie verteilen sich nach dem Zufallsprinzip auf der Oberfläche. Für elektronische Zwecke muss jedoch gewährleistet sein, dass die winzigen Gebilde in kontrollierter und reproduzierbarer Weise genau dort entstehen, wo sie gebraucht werden; eine statistische Verteilung wäre wertlos. Es gibt zwar inzwischen Ansätze, durch geeignete Abscheidungs- oder Wachstumsbedingungen eine gleichmäßigere Anordnung der Nanostrukturen zu erreichen, aber bis heute haben sie nicht zu einer perfekten „Selbst-Ausrichtung" geführt.

Die ist mir in der Gruppe von Karl Eberl am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart – in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart – erstmals gelungen. Durch einen Trick konnten meine Mitarbeiter und ich selbstorganisierte „Nanoinseln" aus Germanium in Reih und Glied auf einer Silizium-Oberfläche aufbringen, ohne dabei ihren Hauptvorteil, die hochgradige kristalline Ordnung, zu beeinträchtigen.

Geschickte Kombination mit der Lithographie

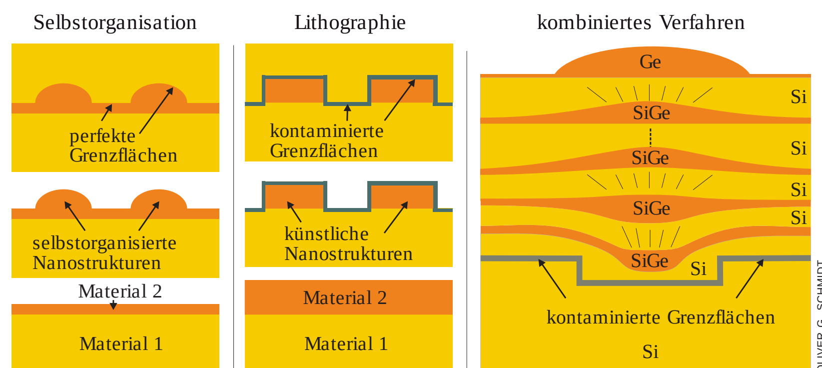
Dazu versahen wir die Silizium-Oberfläche zunächst mittels konventioneller Methoden der Siliziumtechnologie mit flachen periodischen Gräben. Auf der so vorstrukturierten Oberfläche schieden wir dann eine Siliziumschicht ab, damit die scharfen, verunreinigten Kanten der Gräben bedeckt und abgerundet wurden.

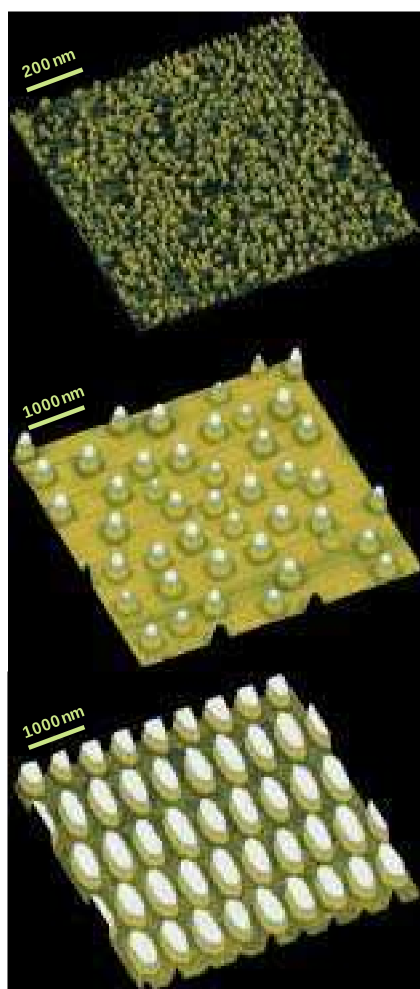
Dann ließen wir abwechselnd je 15 Schichten aus Silizium-Germanium und Silizium aufwachsen. Der Clou an dieser Vorgehensweise ist, dass das Silizium-Germanium-Material während des Wachstums bevorzugt in die Gräben diffundiert und sich dort anreichert, sodass eine Inhomogenität entsteht. Weil die Atome von Germanium größer sind als die von Silizium, wird dessen Kristallgitter in der nachfolgenden Schicht gezwungen, sich über der Inhomogenität zu dehnen. Das veranlasst die nächste Silizium-Germanium-Lage, sich wiederum genau an dieser Stelle in einer etwas dickeren Schicht abzuscheiden. Die Inhomogenität pflanzt sich so automatisch in Wachstumsrichtung fort. Zugleich wird der ursprünglich eingeritzte Graben zunehmend eingeebnet; dadurch verwandelt sich die periodisch strukturierte Oberfläche nach und nach in eine glatte Oberfläche mit periodisch gedehnten Bereichen.

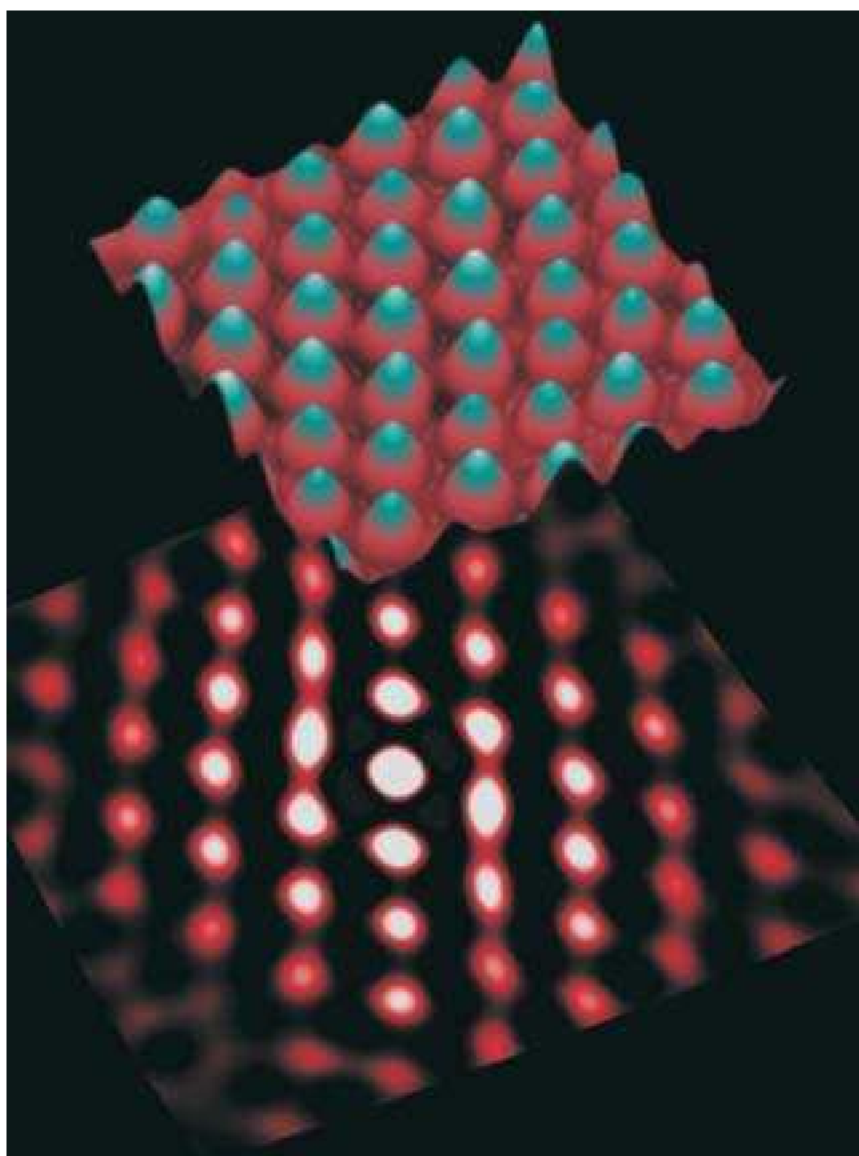
Auf ihr schieden wir schließlich reines Germanium ab. Es bildete in gewohnter Weise selbstorganisierte Nanoinseln aus. Aber diesmal waren sie nicht zufällig verteilt, sondern ordneten sich exakt über den gedehnten Bereichen und damit über den zuvor künstlich erzeugten

Zielgenaue Abscheidung

Um Nanoinseln aus Germanium an definierten Stellen auf einem Siliziumsubstrat zu erzeugen, versahen der Autor und seine Mitarbeiter das Silizium zunächst mittels lithographischer Methoden mit Gräben. Darüber schieden sie im Wechsel 15 Schichten aus Silizium-Germanium und reinem Silizium ab. Weil sich das Silizium-Germanium bevorzugt in den Gräben ansammelt und dadurch das Kristallgitter der nachfolgenden reinen Siliziumschicht dehnt, pflanzt sich die Inhomogenität nach oben fort und wirkt schließlich als Keim für die zielgenaue Abscheidung von perfekt kristallisierten Germanium-Nanoinseln.







Germanium kann auf einer Silizium-Oberfläche durch Selbstorganisation Nanoinseln bilden. Deren Größe und Form lässt sich über die Abscheidungstemperatur – oben 500 °C, Mitte 700 °C – in weiten Grenzen steuern. Allerdings verteilen sich die Nanoinseln regellos über die Oberfläche. Dagegen bilden auf herkömmlichem lithographischem Wege erzeugte Strukturen ein vorgegebenes Muster (unten), was für Elektronikbausteine unabdingbar ist.

Germanium-Nanoinseln haben sich auf einer Silizium-Oberfläche definiert angeordnet. Die obere Ebene zeigt das Realbild einer Rasterkraftmikroskop-Aufnahme (1,7 × 1,7 Quadratmikrometer), die untere die zugehörige Autokorrelation. Sie spiegelt die hexagonale Symmetrie der Struktur wider. Zum Rand hin wird sie unscharf, weil die Nanoinseln in einer Richtung nur über kurze Distanzen streng periodisch angeordnet sind.

Gräben an. Ebenso wichtig ist, dass sie sich weit über der beim Ritzen zwangsläufig verunreinigten Ausgangsfläche befinden und deshalb ihre außergewöhnlich hohe Kristallqualität bewahren.

Zudem sind die Germanium-Nanoinseln nicht nur fein säuberlich an den Gräben entlang aufgereiht. Obwohl die ursprüngliche Strukturierung nur eindimensional ist, tendieren sie dazu, sich auch in der Fläche in einem zweidimensionalen hexagonalen Gitter anzuordnen. Dahinter steckt wieder ein Selbstorganisationsvorgang. Die hexagonale Anordnung ist deshalb nur von kurzer Reichweite – etwa vier bis fünf Perioden. Perfekte zweidimensionale Muster lassen sich jedoch leicht herstellen, wenn man die Silizium-Oberfläche zu Beginn mit einem zweidimensionalen Muster vorstrukturiert.

Mit unserer Arbeit haben wir somit bewiesen, dass es möglich ist, eine Brücke von selbstorganisierten Nanostrukturen zu den höchstintegrativen Technologien zu schlagen, die bei der Chipproduktion eingesetzt werden. Weil sich Silizium und Germanium chemisch exzellent vertragen, wäre es vorstellbar, dass ein Siliziumtransistor der Zukunft von den positiven elektronischen Eigenschaften einer Germanium-Nanoinsel profitiert.

Unsere Methode ist selbstverständlich nicht auf diese beiden Elemente beschränkt. Kürzlich haben wir das gleiche Verfahren erfolgreich auf die Halbleiterkombination Gallium-/Indiumarsenid angewandt – ein Materialsystem, das sich in jedem Handy findet. ■

Oliver G. Schmidt *ist promovierter Festkörperphysiker und leitet am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart die Forschungsarbeiten in der Molekularstrahl-Epitaxie-Gruppe. Er wurde mit dem diesjährigen Philip-Morris-Forschungspreis ausgezeichnet.*

VISUELLE WAHRNEHMUNG

Stereosehen und das zyklopische Auge

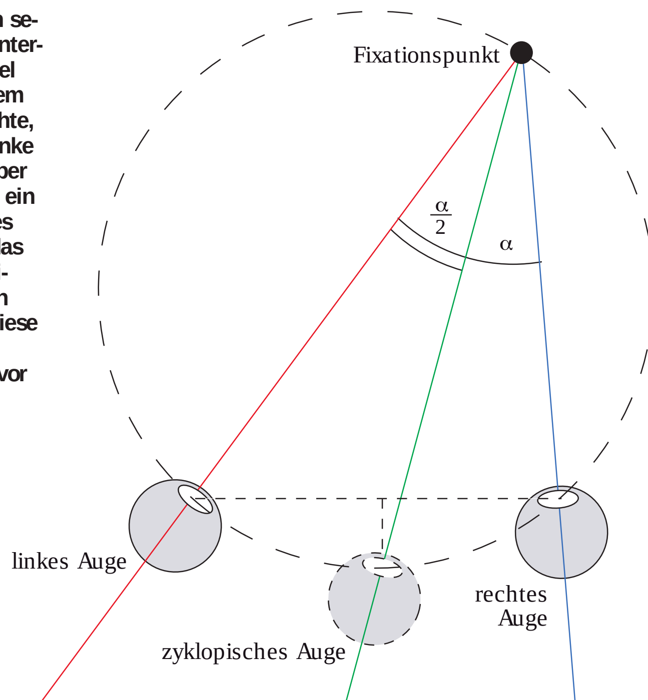
Wie konstruiert unser Gehirn aus den Netzhautbildern beider Augen eine dreidimensionale Ansicht der Welt? Bisherige Antworten waren wenig überzeugend, doch eine neurophysikalische Theorie liefert nun eine elegante Erklärung.

Von Rolf D. Henkel

Gibt man Dreijährigen eine Röhre zum Hindurchschauen in die Hand, setzt sie immerhin ein Drittel von ihnen nicht vor ein Auge, sondern genau in die Mitte zwischen beiden Augen. Dass dies nichts nützt, lernen wir allerdings schnell; unter den vierjährigen Kindern begeht nur noch jedes zehnte diesen „zyklopischen“ Irrtum. Immerhin ließ er sich vor wenigen Jahren sogar bei Erwachsenen nachweisen.

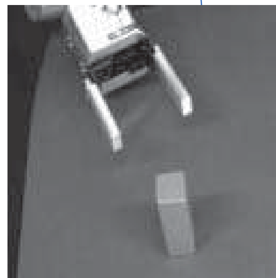
Der Fehler hat Methode: Wir haben zwar kein Auge auf der Nasenwurzel, aber unser Gehirn konstruiert sich eins. Dieses virtuelle Auge ist die einfache neuronale Lösung eines Problems, das dadurch entsteht, dass wir die Welt mit zwei Augen betrachten.

Dabei entstehen zwei Ansichten aus leicht verschiedenen Blickwinkeln. Legt man sie übereinander, erscheinen die meisten Objekte mit Doppelkonturen, weil sie wegen der perspektivischen Verschiebung nicht exakt zur Deckung kommen. Diese Verschiebung enthält Informationen über die Entfernung des jeweiligen Objekts: Je größer sie ist, desto näher liegt es. Aus diesen beiden Bildern konstruiert unser Gehirn ein drittes, das obendrein Entfernungsinformationen beinhaltet. Es bildet die Basis des räumlichen, dreidimensionalen Sehens.









Unsere beiden Augen sehen die Welt leicht unterschiedlich. Im Beispiel zeigt der Holzklotz dem einen Auge seine rechte, dem anderen seine linke Seite. Wir nehmen aber ein Bild wahr, wie es ein virtuelles zyklopisches Auge sehen würde, das etwa in der Mitte zwischen unseren beiden realen Augen sitzt. Diese Anordnung skizzierte Ewald Hering schon vor über hundert Jahren.

ROLF D. HENKEL, UNIVERSITÄT BREMEN

Erste systematische Experimente zur Frage des Stereosehens machte bereits 1858 Peter Ludwig Panum, damals Professor für Physiologie an der Universität Kiel. Er fand heraus, dass wir die beiden unterschiedlichen Retinabilder – zumindest in einem kleinen Raumbereich, der heute seinen Namen trägt – zu einem neuen Bild ohne Doppelkonturen fusionieren. Diese neue, vom Gehirn konstruierte Ansicht zeigt uns, wie ein paar Jahre später Ewald Hering an der Karls-Universität zu Prag folgerte, die Dinge so, als würden wir sie aus der Perspektive eines virtuellen, zyklopischen Auges zwischen den beiden realen Augen wahrnehmen.

Wirkliche Theorien zum Stereosehen gibt es aber erst seit etwa zwanzig Jahren. Die meisten wurzeln in der klassischen, „symbolverarbeitenden“ Forschungsrichtung der Künstlichen Intelligenz und behandeln nur die Entfernungsberechnung aus Stereobildern, nicht aber die Fusion zur zyklopischen Ansicht. Dabei nimmt man an, dass aus den Rohdaten zunächst Merkmale („Symbole“) extrahiert werden, die sich selbst unter variablen Lichtverhältnissen gut lokalisieren lassen – etwa die Kanten von Objekten. Spätere Verarbeitungsstufen benutzen dann nur noch die extrahierten Symbole.

Um die perspektivischen Verschiebungen zwischen den Bildern und daraus die Entfernungen zu bestimmen, müsste das Gehirn zu jedem im linken Bild entdeckten Symbol das passende im rechten finden. Wie sich herausstellt, ist diese Zuordnungs- und Suchaufgabe ein kompliziertes kombinatorisches Problem – sogar eines, das Mathematiker in die Kategorie „schlecht gestellter“ Probleme einordnen: Es gibt dafür nämlich keine eindeutige Lösung. Jedem im linken Bild gefundenen Symbol könnte zunächst jedes im rechten detektierte entsprechen. Natürlich ist nur eine der vielen möglichen Zuordnungen die richtige; die Zahl der falschen steigt mit der Zahl der detektierten Symbole stark an.

Viel Arbeit ist investiert worden, um dieses komplizierte Zuordnungsproblem zu lösen, doch genau genommen ist es erst durch die Annahme der Symbolverarbeitung entstanden. Jede Symbolbeschreibung vereinfacht, und genau hierin liegt das Problem: Erweitert man die verwendete Symbolbeschreibung, indem ▶

Kohärenzdetektion

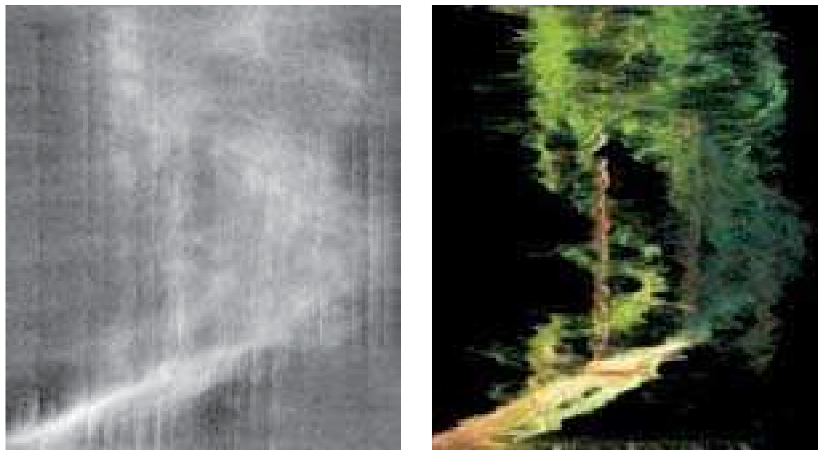
Entfernungsmessung in der Sehrinde

Ein Neuron in der Sehrinde im Gehirn kann jeweils nur einen kleinen Ausschnitt der Welt „sehen“; sofern es ein binokulares („beidäugiges“) Neuron ist, besitzt es zwei solcher rezeptiven Felder, je eines im linken und im rechten Augenbild. Nur wenn die beiden rezeptiven Felder eines entfernungsmessenden Neurons in etwa auf den gleichen Ort schauen, kann es einen korrekten Schätzwert über die perspektivische Verschiebung liefern. Die meisten entfernungsbestimmenden Neuronen empfangen jedoch nicht zwei passende Bilder, sondern verschiedene oder, schlimmer noch, solche, die gleich aussehen, in Wahrheit aber von verschiedenen Objektpunkten stammen, wie etwa in den populären Stereogramm-Vexierbildern.



ROLF D. HENKEL, UNIVERSITÄT BREMEN

Neuronen in der Sehrinde im Gehirn befassen sich jeweils nur mit einem kleinen Ausschnitt der Welt (Kreise); binokulare Neuronen, die Entfernungen bestimmen können, bekommen ihre Informationen aus zwei kleinen, im linken und rechten Augenbild festliegenden rezeptiven Feldern. Diese können je nach Augenstellung richtig zueinander angeordnet sein (gelbe Kreise), oder aber falsch (rote Kreise).



ROLF D. HENKEL, UNIVERSITÄT BREMEN

Im Computer lässt sich das Stereosehen durch Kohärenzdetektion simulieren. Links ist, getrennt für jede Bildzeile, aufgetragen, wie viele entfernungsbestimmende Neuronen welche Entfernung gemeldet haben – je mehr, desto heller der Grauton. Nach der Kohärenzdetektion und Mittelung über jeweils ganze Bildzeilen lichtet sich der Nebel (rechts): Der Weg, der hohe Baum und seine Blätter werden richtig erkannt. Kohärente Cluster sind mit der Farbe der Eingangsdaten eingefärbt.

Aus physiologischen Gründen sind Neuronen jedoch unfähig zu schweigen, selbst wenn sie, wie in diesem Fall, nichts zu melden haben. Stattdessen geben sie, wie eine Autofokus-Automatik, die keinen Anhaltspunkt findet, irgendeine zufallsabhängige Entfernung an. Es entsteht also ein buntes Chaos von Zufallsmeldungen – darin geisterhaft versteckt die der wenigen Neuronen, die tatsächlich eine Entfernung korrekt gemessen haben. Eine Mittelwertbildung über alle Entfernungsangaben würde deshalb ein unbrauchbares Ergebnis liefern.

Während aber falsch signalisierende Neuronen sich nicht einig sind, liefern die richtig signalisierenden ungefähr übereinstimmende Resultate. Das haben sie letztlich der Tatsache zu verdanken, dass der hier beispielhaft gezeigte Baumstamm ein ausgedehntes Objekt mit einer einigermaßen einheitlichen Entfernung ist. Die Außenwelt sorgt also dank ihrer Strukturiertheit für ein wenig Ordnung im Chaos der Neuronensignale; dieser geordnete Anteil muss nur noch auf Kosten des ungeordneten verstärkt werden.

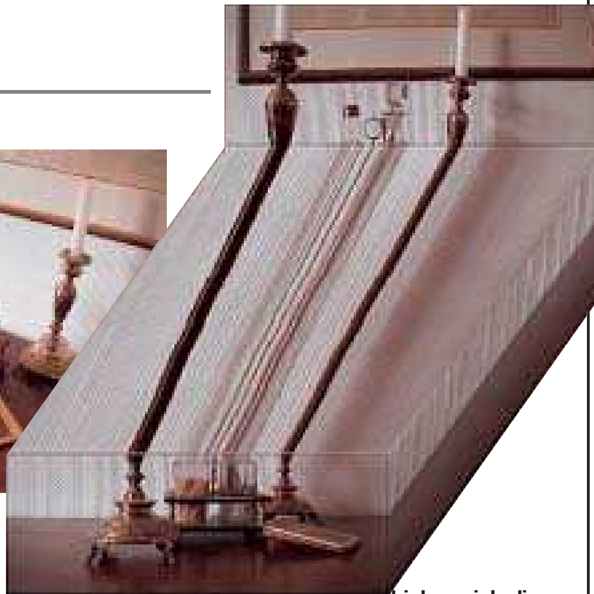
Genau dies leistet eine geeignete Verschaltung der Neuronen untereinander, die eine „Kohärenzdetektion“ ermöglicht. Sie lässt nur die Daten der wenigen Neuronen übrig, deren Schätzwerte die richtige Entfernung der Objekte angeben.

man nicht nur „Objektkanten“ registriert, sondern auch, ob sie hell oder dunkel sind, halbiert sich sofort die Zahl der möglichen falschen Zuordnungen. In neueren Varianten dieser Theorien wird deshalb auch unterstellt, dass das visuelle System eine ganze Reihe von sehr unterschiedlichen Merkmalen extrahiert.

Das ändert aber nichts daran, dass stabile Merkmale wie Objektkanten nur in wenigen Bereichen einer Szene auftreten; nur dort erlaubt eine symbolbasierte Theorie, Entfernungen zu bestimmen. Für alle anderen Bereiche ist man auf intelligentes Raten angewiesen, was deutlich schlechtere Ergebnisse liefert als das menschliche Sehsystem.

Man kann sich dem Problem jedoch von einer ganz anderen Seite nähern. Die neuronalen Strukturen, die für so unterschiedliche Aufgaben wie Texturanalyse, Bewegungswahrnehmung und Stereosehen verantwortlich sind, ähneln sich auf verblüffende Weise. Benutzen sie gemeinsame Verarbeitungsprinzipien? In der Tat – alle drei Wahrnehmungsleistungen stellen sich auf der algorithmischen Ebene als sehr ähnlich dar.

Der Zusammenhang lässt sich folgendermaßen verdeutlichen. Bewegt man seinen Kopf quer zur Blickrichtung, verschieben sich alle im Blickfeld befindlichen Objekte horizontal – und zwar umso mehr, je näher sie liegen. Ordnet man nun die während einer solchen Bewegung aufgenommenen Bilder zu einem Bildstapel an, finden sich darin charakteristische Texturlinien: Solche, die fast gerade nach hinten verlaufen, entsprechen weiter entfernten Objekten, wohingegen stärker geneigte zu näheren Objekten gehören.

ROLF D. HENKEL, UNIVERSITÄT BREMEN

Fährt man mit einer Kamera an einer statischen Szene entlang, verschieben sich die Objekte im Bild, abhängig von ihrer Entfernung. Wenn die Einzelaufnahmen zu einem Bildstapel arrangiert werden, entsteht für jeden Gegenstand eine Texturlinie, deren Neigung seine Entfernung anzeigt: Je schräger sie verläuft, desto näher ist das Objekt.

Bewegungssehen läuft also auf eine Texturanalyse hinaus, wenn auch in einem abstrakten Texturraum. Und wie steht es mit dem Stereosehen? Dabei wird eine Szene zwar nicht durch eine bewegliche Kamera abgetastet, aber man kann die Bilder beider Augen als Anfangs- und Endpunkt einer gedachten Kamerabewegung zwischen den beiden Augenpositionen auffassen. Vom kompletten Bildstapel bleiben dann zwei Scheiben übrig, doch reicht dies für eine Entfernungsanalyse gerade aus.

Filterung relevanter Daten aus dem Signalrauschen

Ein Problem bleibt allerdings: Ein einzelnes bildverarbeitendes Neuron „sieht“ immer nur einen sehr kleinen Ausschnitt der Welt. Die Informationen, die es aus diesem so genannten rezeptiven Feld extrahieren kann, sind manchmal irrelevant für die aktuelle Aufgabenstellung und oft einfach falsch. Das Ausgangssignal solcher Neuronen wirkt als störendes Rauschen, das die eigentliche Nachricht überdeckt. Beim Stereosehen wird dies besonders deutlich, da hier entlang der „Zeit“-Achse nur an zwei Orten, nämlich den beiden Augenpositionen, Daten aufgenommen werden.

Wie lässt sich die Unterscheidung zwischen Rauschen und Daten treffen? Eine interessante Möglichkeit besteht darin, einfach die physikalischen Eigenschaften der Außenwelt zu nutzen, die das jeweilige neuronale Netzwerk analysiert. Im Falle des Stereosehens funktioniert das so (siehe Kasten links oben): Jede Gruppe von entfernungsberechnenden Neuronen wird durch das Objekt, auf das sie reagieren, in genau zwei verschiedene Untergruppen geteilt. Die Mitglieder der einen Untergruppe – und das ist der überwiegende Teil – kommen zu irgendwelchen zufälligen Schätzwerten. Nur eine Minderheit von Neuronen, deren rezeptive Felder gerade passend liegen, kann die gesuchte Objektentfernung in etwa richtig bestimmen. Diese Neuronen zeichnen sich nun gerade dadurch aus, dass sie in etwa dasselbe Ergebnis liefern; sie sind daher, im Gegensatz zu ihren Kollegen, miteinander kohärent.

Überraschenderweise gibt es eine recht einfache neuronale Verschaltung, die diese Kohärenz feststellen kann. Die Gruppe der Neuronen, die annähernd dasselbe Ergebnis liefern, entwickelt nämlich durch schwache laterale Kopplungen nach kurzer Zeit miteinander synchronisierte Signale. Diese können sehr effektiv an nachgeschaltete Verarbeitungsstufen weitergeleitet werden.

Die Signale der inkohärenten Restgruppe bleiben dagegen asynchron und damit zu schwach, um nachgeschaltete Stufen zu beeinflussen. Im Endeffekt werden durch die Synchronisation die korrekten Daten aus dem Rauschen herausgefiltert. Mit ihnen lässt sich dann im Falle des Stereosehens die gesuchte Entfernung des Objekts berechnen.

Interessant wird es, wenn man die Eingangssignale der aufgefundenen kohärenten Neuronengruppen in Abhängigkeit vom Raumwinkel darstellt. Dadurch entsteht eine neue Ansicht der Szene, die aber, wie sich herausstellt, in ihrer Perspektive weder mit der des linken noch des rechten Auges übereinstimmt. Bei genauerem Hinsehen entdeckt man, dass die neue Ansicht die Szene aus der Sicht genau jenes zyklopischen Auges zeigt, das Hering schon vor über hundert Jahren postuliert hat.

Mittlerweile gibt es auch bereits eine erste technische Umsetzung der Kohä- ▶

renztheorie des Stereosehens in Hardware-Form. Die Firma 3D-Image-Processing GmbH in Augsburg hat dazu eine spezielle Einsteckkarte für PCs realisiert. Darauf bildet ein frei konfigurierbarer Logikbaustein mit bis zu zwei Millionen Logikgattern, ein so genannter FPGA (*field-programmable gate array*), die Operationen des neuronalen Netzwerkes in Silizium nach.

Die stereoskopischen Daten für die Einsteckkarte können über den PC, eine speziell konstruierte Stereokamera oder beliebige industrielle Videokameras eingespeist werden. Das Stereomodul vermag pro Sekunde fast vierzig Bilder zu verarbeiten, deren Auflösung bis zu 1024 × 1024 Pixel betragen kann. Für jedes Pixel errechnet es einen sehr genauen Entfernungswert, da mit dem Verfahren noch Bildverschiebungen erkannt werden können, die deutlich kleiner als ein einzelnes Pixel sind. Eine solche Rechenleistung erforderte bislang mehrere große, miteinander vernetzte Parallelrechner.

Das kohärenzbasierte Stereoverfahren gibt – im Unterschied zu anderen Stereotechniken – für jedes Pixel auch an, für wie zuverlässig das neuronale Netzwerk den angegebenen Entfernungswert hält. Das ist für viele Applikation in der industriellen Bildverarbeitung wichtig, zum Beispiel in der Robotik oder bei Fahrerassistenzsystemen. Andere Anwendungen – etwa in der Automatisierungstechnik – profitieren gleichfalls von dieser Datenvalidierung. Auch über den Einsatz einer miniaturisierten Version als Blindenhilfe wird nachgedacht. ■

Rolf D. Henkel *ist promovierter Festkörperphysiker und arbeitet am Institut für Theoretische Neurophysik der Universität Bremen.*

Am Rande

Neulich bei der S/M-Party …

Menschliche Chromosomen, die im Falschfarbenbild eher wie Teddybären aussehen, zieren die Karte: Der Chefredakteur des Daily Telegraph gibt sich die Ehre, mich zu der „Scientists Meet the Media Party 2002“ (im Folgenden als S/M-Party abgekürzt) einzuladen. Wie bitte? Ich kenne den Mann doch gar nicht. Und seine Zeitung fasse ich, wenn überhaupt, dann nur mit sehr spitzen Fingern an. Aber andererseits: Es gibt Champagner, und meine schmalbrüstige Liste von Medienkontakten könnte eine Erweiterung gebrauchen. Also gut … warum nicht?

Auf der Antwortkarte soll ich angeben, ob ich S oder M bin, pardon: ob ich als Vertreter der Wissenschaft oder der Medien gelten möchte. Ich frage zurück, ob ich auch ein Mittelding haben kann, bekomme aber keine Antwort. Die Partybonzen beschließen kurzerhand, mich der Wissenschaft zuzuschlagen. Auch gut, dann kann ich also die Medien treffen.

Die Party findet in den feudalen Räumlichkeiten der Royal Society statt. Zum Glück haben die Herrschaften nicht meine Glosse im Novemberheft von Spektrum gelesen, sonst würden sie mich gar nicht hereinlassen.

In der Eingangshalle empfängt mich Robert Boyle, einer der Mitbegründer der ehrwürdigen Gesellschaft. Leider nur zweidimensional – in Gestalt eines Ölgemäldes an der Wand. Noch tags zuvor hatte ich mit der Lektorin meines neuen Buchs („Light & Life“) darüber gesprochen, woher wir dafür günstig ein Porträt von Boyle bekämen; denn zu dessen Pioniertaten zählten auch Untersuchungen über Biolumineszenz. Aber hier einfach das Gemälde abhängen? Das könnte unangenehm auffallen, und der Schinken wäre auch etwas unhandlich.

Mit einem Glas Rotwein ausgestattet, mache ich mich auf den Rundgang durch die „kleineren“ Räume (jeder hat etwa die Grundfläche, die meiner fünfköpfigen Familie zur Verfügung steht). Da gibt es die Stände der üblichen Verdächtigen zu besichtigen: BBC, Nature, Science, New Scientist. Das erinnert mich an ein Manuskript, das schon seit zwei Monaten beim New Scientist schmort.

Am Stand von Nature höre ich zum ersten Mal, dass der Chefredakteur von Chemistry in Britain, Rick Stephens, nach mir sucht. Er muss diese Suche mit viel Einsatz betrieben haben, denn denselben Satz bekomme ich praktisch von jedem zu hören, der mich kennt oder mein Namensschild liest. Aber in einer Menge von über 500 Leuten jemanden zu finden, von dem man nicht weiß, wie er aussieht, ist natürlich ein Problem für sich.

Derweil amüsiere ich mich, indem ich umherwandere und die Namensschilder studiere – ungefähr jedes fünfte ist ein Treffer insofern, als es mir ermöglicht, einem Namen, den ich bereits aus der Presse kannte, ein Gesicht zuzuordnen. Für die Redaktion des New Scientist ist Anwesenheit offenbar Pflicht. Auch Dick Fifield schwirrt an mir vorbei … halt, wie geht es eigentlich meinem Manuskript? Es geht ihm gut, zum Glück. Soll nächsten Monat erscheinen.

Im Vortragssaal (Turnhallenformat) gibt’s den Champagner, und auch eine Art Vortrag des Nobelpreisträgers Harry Kroto. Eher eine inkohärente Montage von merkwürdigen Bildern und Videoschnipseln, die vor allem verrät, für wie gering Sir Harry die Konzentrationsspanne von Journalisten hält. Dementsprechend fasst er sich auch sehr kurz und räumt die Bühne schon bald wieder, sodass die dezentralen Einzelgespräche (die sich in dem großen Raum zu einem Höllenlärm aufsummieren) weitergeführt werden können.

Unterdessen habe ich ein paar Promis entdeckt – Simon Singh, Martin Rees, Lewis Wolpert – sowie einige ehemalige Kolleg(inn)en vom Zentrum für Molekularbiologie in Oxford. Von den Superstars der britischen Populärwissenschaft (Richard Dawkins, David Attenborough, Patrick Moore, Susan Greenfield, Paul Davies, Stephen Hawking, Steve Jones, Steven Rose usw.) allerdings keine Spur. Vielleicht wussten die auch nicht, ob sie S oder M sind. Immerhin scheint die Verquirlung der ansonsten nicht mischbaren S- und M-Phasen einigermaßen zu funktionieren, obwohl mich ein erfahrener Partygast gewarnt hatte, dass die Wissenschaftler und die Medienvertreter gewöhnlich jeweils unter sich blieben.

Schließlich stoße ich auf eine Ansammlung von Mitarbeitern der Royal Society of Chemistry (die Chemistry in Britain herausgibt) und frage nun meinerseits nach Rick Stephens, um den Armen von seiner Suche zu erlösen. Einem der Umstehenden gelingt es tatsächlich, ihn aus der Menge zu fischen. Er will allerdings gar nichts Besonderes von mir, sondern nur seinen fleißigsten freien Mitarbeiter endlich einmal persönlich kennen lernen. Mission accomplished – dann kann ich mich ja beruhigt auf den Heimweg machen.

Michael Groß
www.michaelgross.co.uk

 (Seiten 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

BESCHLEUNIGERPHYSIK

Licht mit Zukunft

Bei Desy in Hamburg arbeitet jetzt ein weltweit einmaliger Freie-Elektronen-Laser bei Wellenlängen im Ultraviolettbereich. Er ist Teil einer Testanlage, die bis 2004 weiter ausgebaut wird und den Elektron-Positron-Collider Tesla vorbereitet.

Von Georg Wolschin

Als eines der acht Hamburger Projekte für die Expo in Hannover machte sie schon vor eineinhalb Jahren Furore: die Testanlage für den geplanten supraleitenden Teilchenbeschleuniger Tesla (*TeV Energy Superconducting Linear Accelerator*) am Physik-Forschungszentrum Desy in Hamburg. Tesla ist als so genannter Linear-Collider konzipiert: Elektronen und ihre Antiteilchen (Positronen) sollen auf einer Strecke von jeweils etwa fünfzehn Kilometern Energien von 500 bis 800 Milliarden Elektronenvolt erreichen und dann frontal aufeinander prallen. Primär erhofft man sich davon grundlegende neue Erkenntnisse über Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen.

In der Testanlage werden vorab die wichtigsten Komponenten auf sehr viel kürzerer Strecke geprüft. Dabei handelt es sich insbesondere um die etwa einen Meter langen supraleitenden Hohlraumresonatoren aus hochreinem Niob, die mit den darin erzeugten elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern die Elektronen antreiben. Für Tesla sind rund 20 000 davon vorgesehen.

Der Beschleuniger soll jedoch auch einem weiteren Zweck dienen: Die Betreiber möchten die hohe Qualität des Elektronenstrahls zusätzlich für einen Freie-Elektronen-Laser (FEL) nutzen, der in den bisher unzugänglichen Spektralbereichen jenseits der UV-Region operiert. Mit der vorläufigen Version in der Testanlage wurden im Februar 2000 bereits Laserlichtblitze im Vakuum-Ultraviolett bei 109 Nanometern erzeugt – ein Weltrekord. Inzwischen lässt sich über die Energie der Elektronen die Wellenlänge zwischen 80 und 180 Nanometern variieren, und bei 98,1 Nanometern wurde im September 2001 die maximal mögliche Verstärkung (Sättigung) des FEL erreicht. Die Spitzenleistungen der Lichtpulse liegen dabei im Gigawatt-Bereich. Beim weiteren Ausbau soll bis 2004 auch das weiche Röntgengebiet bis hinunter zu sechs Nanometern erschlossen werden.

Bisher haben Beschleuniger nur Synchrotronstrahlung erzeugt. Sie ist zwar vielfach intensiver und kurzwelliger als gewöhnliches Licht, aber nicht kohärent: Anders als bei Laserstrahlung schwingen die Photonen nicht im Gleichtakt und überdecken ein kontinuierliches Energiespektrum, statt alle ein und dieselbe Energie zu haben. Synchrotronstrahlung wird üblicherweise von Elektronen ausgesandt, die in einem Synchrotron auf einer Kreisbahn umlaufen. Ursprünglich ein eher unerwünschtes Nebenprodukt, ▶

hat die hochenergetische Strahlung inzwischen viele bedeutende Anwendungen gefunden – von der Herstellung feiner Strukturen in der Mikroelektronik über die Erforschung des dreidimensionalen Aufbaus von Molekülen bis hin zu medizinischen Untersuchungen wie der Darstellung der Herzkranzgefäße.

Schon seit längerem werden deshalb sogar eigens Anlagen zu ihrer Erzeugung gebaut. In den modernsten Quellen für Synchrotronstrahlung wie Bessy II in Berlin oder der European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble ist es dabei gelungen, die Leuchtstärke (Brillanz) bis zu 10000-fach zu steigern. Dazu werden die Elektronen mittels periodischer Magnetstrukturen – so genannter Undulatoren – auf einen Slalomkurs gezwungen. Sie senden dann in Flugrichtung gebündelte elektromagnetische Strahlung aus, deren Wellenlänge von ihrer Bewegungsenergie und der Stärke des Magnetfelds abhängt.

Freie-Elektronen-Laser, von denen es weltweit bereits einige Dutzend gibt (unter anderem am Forschungszentrum Rossendorf, an der Technischen Universität Darmstadt und an der Universität Dortmund), ermöglichen eine weitere beträchtliche Steigerung der Leuchtstärke. Auch hier werden Elektronenpakete durch Undulatoren geschickt. Sie sind jedoch sehr viel kompakter als im Synchrotronstrahlungs-Speicherring und die erzeugten Lichtpulse etwa tausendmal kürzer und zehntausendmal intensiver. Außerdem bestehen die Pulse – wie beim Laser – aus kohärentem Licht: Die Photonen schwingen im Gleichtakt, wohingegen sie sich bei der normalen Synchrotronstrahlung ungeordnet bewegen.

Um die Kohärenz zu erreichen, verwenden die meisten derzeit betriebenen FELs – wie die klassischen Laser – einen optischen Resonator mit einem Spiegelsystem, in dem das Lichtfeld mehrfach reflektiert und von jedem neuen Elektronenpaket weiter verstärkt wird. Dieses Prinzip hatte John Madey – heute an der Universität von Hawaii in Honolulu – 1970 in seiner Dissertation an der Universität Stanford in Kalifornien vorgeschlagen und dort 1977 mit seinen Kollegen verwirklicht. Vor Inbetriebnahme der Tesla-Testanlage lag die kürzeste so erreichte Wellenlänge (in Durham, North Carolina, mit einem FEL aus Novosibirsk) im Ultravioletten bei 193,7 Nanometern; mittlerweile beträgt sie 189 Nanometer (European FEL Project bei Elettra im italienischen Triest).

Will man zu noch kürzeren Wellenlängen vorstoßen, muss auf mehrfache Durchgänge mittels Spiegeln verzichtet werden, denn kurzwellige Röntgenstrahlung lässt sich damit nicht geeignet reflektieren. Viele Jahre schien es deshalb unmöglich, einen FEL für den Röntgenbereich zu bauen.

Doch schon 1980 hatten Anatoli Kondratenko und Evgeni Saldin einen Ausweg aufgezeigt. Danach müssen die Elektronen im Strahl so regelmäßig angeordnet sein, dass ihr Abstand der Wellenlänge der ausgesandten Strahlung entspricht. Sie verstärken dann die Amplitude der Lichtwelle in kohärenter Weise und erzeugen so den Lasereffekt bei nur einem Durchgang des Strahls durch einen langen Undulator; ein optischer Resonator zur allmählichen Verstärkung über mehrere Durchgänge ist nicht mehr erforderlich.

Eine sich selbst verstärkende Strahlungslawine

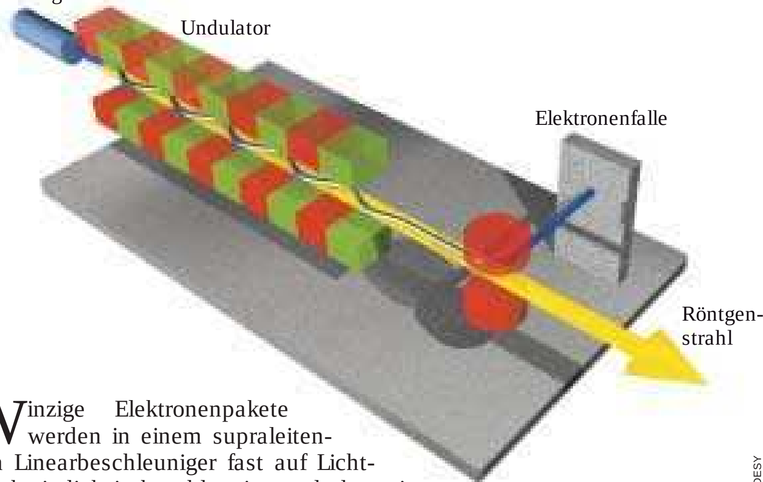
Es zeigte sich, dass ein anfangs ungeordneter Elektronenstrahl bei hinreichender Intensität durch Wechselwirkung mit der von ihm selbst erzeugten Undulatorstrahlung eine solche regelmäßige Dichtemodulation bekommen kann: Je stärker die elektromagnetische Welle wird, desto wirksamer ist die Stimulation, und die kohärente Welle wächst lawinenartig an. Dieser Effekt wird selbstverstärkte spontane Emission (*self-amplified spontaneous emission*, Sase) genannt.

Eine Demonstration des Sase-Prinzips gelang schon 1984 am Lawrence Livermore Laboratory. Ein darauf basierender FEL im Infrarotbereich wurde 1998 in Los Alamos gebaut. Im Jahr 2000 stieß die Advanced Photon Source des Argonne-Nationallaboratoriums mit Wellenlängen von 530 Nanometer dann in die Region des sichtbaren Lichts vor. Mittlerweile hat sie einen Lasereffekt bei 265 Nanometern erreicht. Wie in Argonne und jetzt auch bei Desy gezeigt wurde, wächst die Laserlicht-Intensität exponentiell mit der Länge des Undulators an.

Einen Sase-FEL im Röntgenbereich konzipierten zuerst Forscher am Stanford Linear Accelerator Center in Kalifornien. Bei der Umsetzung erwies sich Desy bisher jedoch als schneller. Mit seinem FEL bei 80 bis 180 Nanometern liegt es derzeit an der Weltspitze.

Wozu ist diese kurzwellige FEL-Strahlung gut? Unter anderem erlaubt ihre hohe Brillanz die Untersuchung von stark verdünnten Proben – beispielsweise von Atomen, Molekülen und Clustern („Atomhaufen“) in der Gasphase. Die Dichte von Strahlen aus diesen Teilchen ▶

Der Freie-Elektronen-Röntgenlaser



Winzige Elektronenpakete werden in einem supraleitenden Linearbeschleuniger fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und dann in einer Struktur mit periodisch wechselndem Magnetfeld – einem Undulator – auf einen Slalomkurs gezwungen. Auf Grund ihrer zickzackförmigen Bewegung senden sie einen Röntgenblitz aus. Dieser holt die Elektronen weiter vorne ein und beschleunigt die langsameren, während er die schnelleren bremst. Dadurch werden die schon sehr kompakten Pakete noch weiter verdichtet. Infolgedessen senden sie intensivere Strahlung aus, während sie ihren Slalomkurs fortsetzen. Diese Strahlung wiederum komprimiert vorausfliegende Elektronenpakete noch mehr. So kommt es zu einem Selbstverstärkungseffekt, der schließlich alle Elektronen völlig synchron oszillieren lässt: Die ausgesandte Röntgenstrahlung addiert sich zu äußerst intensiven Laserpulsen.



Die supraleitenden Hohlraumresonatoren, welche die Elektronen und Positronen im Linearcollider Tesla beschleunigen sollen, bestehen aus hochreinem Niob. Um Verschmutzungen weitestgehend auszuschließen, werden sie in einem Reinraum gefertigt, der nur ein millionstel soviel Staubteilchen enthält wie normale Luft.

ist in der Regel so gering, dass Experimente nur mit intensivem Laserlicht möglich sind. Zudem lässt sich der Zeitabstand zwischen den Laserpulsen auf eine Pikosekunde (billionstel Sekunde) genau einstellen. Dadurch können Elementarprozesse chemischer Reaktionen, die sich auf eben dieser Zeitskala abspielen, erforscht werden. Tatsächlich entspricht die Laserlicht-Wellenlänge von etwa hundert Nanometern, die beim FEL der Tesla-Testanlage derzeit entsteht, genau der Bindungsenergie der äußeren Elektronen, durch die chemische Reaktionen bestimmt sind. Bei noch kürzeren Wellenlängen bis hinunter zu sechs Nanometern, die ab 2004 zugänglich sein sollen, lassen sich dann auch innere Elektronen entfernen, die für jedes Element charakteristische Ionisierungsenergien haben.

Eine weitere wichtige Anwendung ist die Untersuchung biologischer Proben – etwa Proteinen, Viren und lebenden Zellen. Sie werden von kurzwelliger Strahlung sehr schnell geschädigt – bei der Röntgenmikroskopie nach etwa fünfzig Pikosekunden und bei der Strukturanalyse sogar schon nach zehn bis hundert Femtosekunden (billiardstel Sekunden). Ein wenige Femtosekunden kurzer FEL-Blitz bietet die Chance, eine hochaufgelöste Aufnahme zu erhalten, bevor Strahlenschäden die Probe verändert haben.

Für Struktur- und Funktionsuntersuchungen wäre das eine Revolution. So ließe sich etwa die Sauerstoffaufnahme von Myoglobin „filmen". Dieses Muskelprotein ähnelt dem roten Blutfarbstoff Hämoglobin und übernimmt von ihm den Sauerstoff zur Versorgung des Muskelgewebes. Um bewegte Bilder dieses Vorgangs zu erhalten, wären Beugungsexperimente mit einem hochintensiven Röntgenlaser erforderlich – bisher gibt es nur Momentaufnahmen, die mit der Synchrotronquelle an der ESRF in Grenoble gemacht wurden.

Für die Röntgenmikroskopie an lebenden Zellen muss die Strahlung allerdings eine Wellenlänge zwischen 2,3 und 4 Nanometern haben, damit sie von dem im Cytoplasma reichlich vorhandenen Wasser nur schwach absorbiert wird. Die Röntgenstrukturanalyse erfordert sogar Wellenlängen unter einem Nanometer; denn in diesem Bereich liegen die Abstände zwischen den Atomen eines Biomoleküls, und Beugungseffekte, auf denen die Strukturanalyse beruht, treten nur auf, wenn die Wellenlänge der verwendeten Strahlung ähnlich klein ist. Solche Untersuchungen werden also erst mit dem FEL von Tesla selbst möglich, dessen Röntgenlicht dank der hohen Energie, die den Elektronen auf der langen Beschleunigungsstrecke verliehen wird, Wellenlängen bis hinunter zu 0,1 Nanometern erreichen soll.



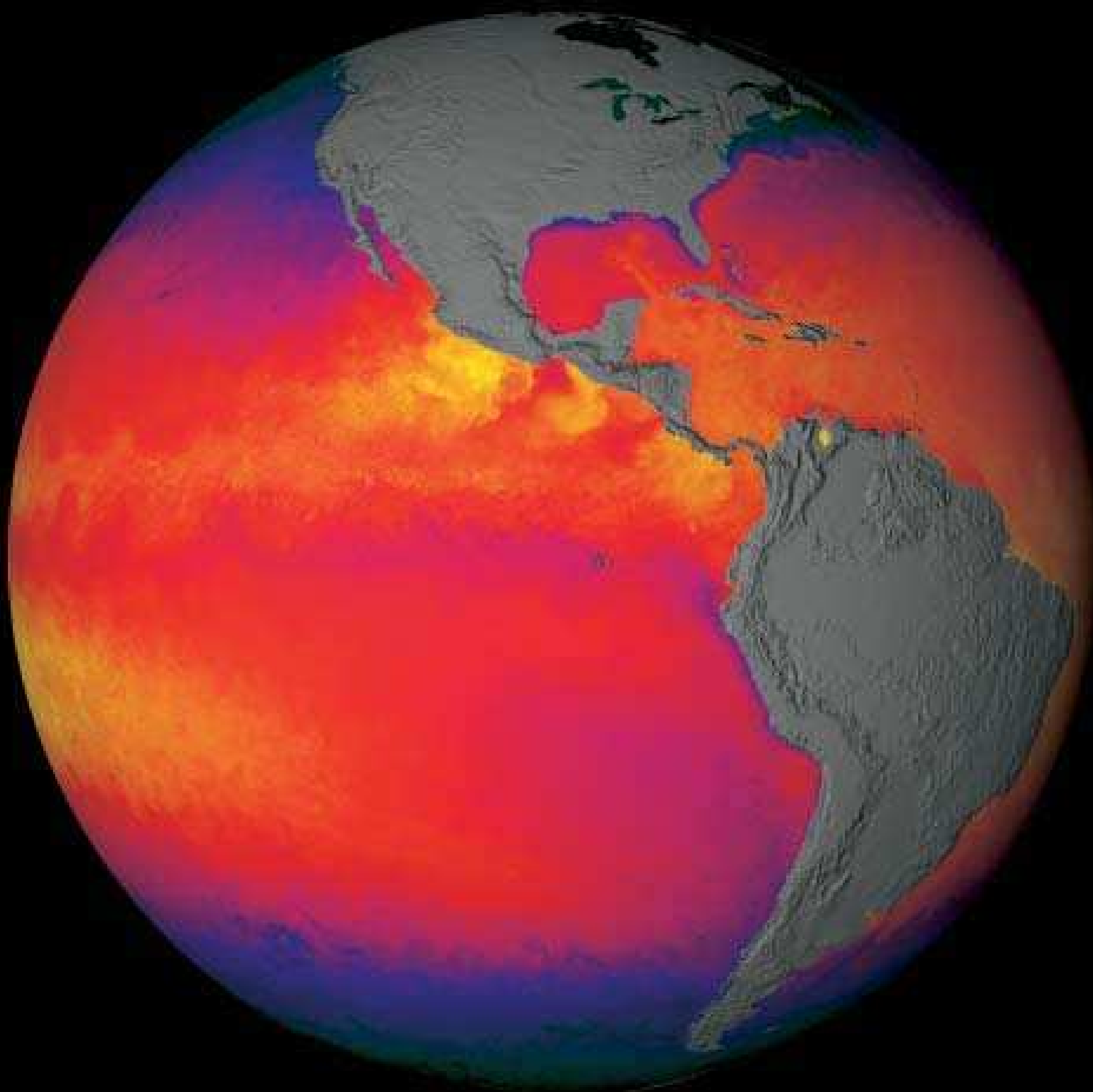
Doppelter Nutzen

Tesla wäre für die Hochenergiephysiker das ideale Gegenstück zum Large Hadron Collider (LHC) am Cern in Genf, bei dem Protonen und Ionen statt Elektronen aufeinander geschossen werden. Der LHC soll 2006 in Betrieb gehen. Die Entscheidung über das Tesla-Projekt steht bis spätestens Ende 2003 an. Fällt sie positiv aus, könnte der Schildvortrieb für den Tunnel ein halbes Jahr später beginnen. Insgesamt ist mit ungefähr acht Jahren Bauzeit zu rechnen. Demnach dürfte es bis 2010/11 dauern, ehe die ersten unterirdischen Teilchen-Kollisionen stattfinden und die Röntgenstrahlen des Freie-Elektronen-Lasers fächerförmig in die zwanzig Stationen der oberirdischen Experimentierhalle gelenkt werden.

Bis dahin wären 7000 Personenjahre Arbeit zu leisten – eine Anstrengung, die nur in internationaler Zusammenarbeit zu bewältigen ist. Deshalb lässt sich nicht völlig ausschließen, dass Tesla trotz positiver Ergebnisse der jetzigen Vorbereitungsphase nicht gebaut wird. Das Laserlicht der Testanlage mit einem 300-Meter-Beschleuniger wird aber in jedem Fall ab 2004 für Experimente zur Verfügung stehen. ■

Georg Wolschin *ist theoretischer Physiker und Wissenschaftsjournalist; er lehrt an der Universität Heidelberg.*

Fiebermessung aus dem All



JESSE ALLEN / MODIS OCEAN TEAM / REMOTE SENSING GROUP AN DER UNIVERSITÄT MIAMI

Ein neuer Sensor, der an Bord eines Nasa-Satelliten die Erde umrundet, liefert jetzt jeden Tag die weitaus detaillierteste weltweite Karte der Oberflächentemperaturen des Meerwassers, die jemals erstellt wurde. Wie ein riesiges hochkompliziertes Thermometer ermittelt der Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) vom Weltraum aus die Fieberkurve der Ozeane. Mit diesen Daten können Klimaforscher und Meteorologen viel besser als bisher untersuchen, wie die Meere mit der Atmosphäre wechselwirken und dabei Wettermuster erzeugen, die auf lange Sicht unser Klima beeinflussen. Auf diesem farbcodierten Bild nimmt die Wassertemperatur von blau über rot nach gelb zu. Wie man sieht, steigt derzeit relativ kaltes Wasser (purpurfarben) vor der Küste Perus auf, wandert nach Norden und dann mit dem westlichen Südäquatorialstrom über den Pazifik Richtung Indonesien. Dies entspricht dem normalen Zustand des Stillen Ozeans. Während eines so genannten El-Niño-Ereignisses schwappt dagegen eine gewaltige Warmwasserwoge von Indonesien nach Südamerika und erzeugt an dessen Westküste Unwetter.

INFORMATIK

Roboter, die sich selbst vermehren

Was Karnickeln nicht schwer fällt, scheint für künstlich hergestellte Dinge unmöglich – bislang. Computersimulationen weisen neue Wege zu Maschinen, die sich selbst fortpflanzen können.

Von Moshe Sipper und James A. Reggia

Aus einem Apfelkern entsteht ein Apfelbaum mit Äpfeln, die ihrerseits Apfelkerne enthalten. Letzten Endes reproduziert der Apfelkern sich selbst – eine Fähigkeit, die heute noch keine Maschine hat. Typischerweise ist der Apparat zur Produktion einer Maschine sogar weit komplizierter als die Maschine selbst. Können wir ein künstliches Ding mit der Fähigkeit ausstatten, eine Kopie seiner selbst herzustellen?

Die historische Antwort auf diese Frage ist ein klares Nein. Die Fähigkeit zur Selbstvermehrung galt sogar seit jeher als ein entscheidender Unterschied zwischen Belebtem und Unbelebtem. Wie Lebewesen sich reproduzieren, war mit einer Aura des Geheimnisvollen umgeben – in der Vergangenheit wegen mangelnder Kenntnisse noch mehr als heute; umso abwegiger erschien es, dass je ein künstliches Objekt diese Fähigkeit erlangen könnte. Als der Mathematiker und Philosoph René Descartes (1596–1650) der Königin Christina von Schweden erklärte, Tiere seien im Wesentlichen eine Art mechanischer Automaten, soll diese auf eine Uhr gezeigt und entgegnet haben: „Dann seht zu, dass sie Nachkommen hat!“

In der Mitte des vergangenen Jahrhunderts gelang es dem genialen Mathematiker und Physiker John von Neumann (1903–1957), die bis dahin philosophische Frage zu einer Angelegenheit von Wissenschaft und Technik zu machen, indem er theoretisch ausarbeitete, wie eine selbstreplizierende Maschine beschaffen sein könnte. Einige Wissenschaftler haben rudimentäre Versionen solcher Maschinen tatsächlich hergestellt, zum Beispiel – aus Sperrholz – vor gut vierzig Jahren der britische Genetiker Lionel Penrose und sein Sohn Roger, der später als Physiker berühmt wurde. Aber die Realität ist so schwierig, dass die meisten Forscher sich bis heute auf die von John von Neumann entwickelte theoretische Version beschränken: zweidimensionale zelluläre Automaten.

Ein zellulärer Automat ist im Grunde eine äußerst schlichte Welt mit Naturgesetzen, die der Konstrukteur selbst bestimmen kann. Realisiert wird sie als Computerprogramm. Da Gegenstände in dieser virtuellen Welt weitaus einfacher zu handhaben sind als in der echten – so braucht man sich um ihre Energieversorgung und ihre Stabilität keine Gedanken zu machen –, können die Forscher sich auf die grundlegenden Fragen des Informationsflusses konzentrieren. Wie können sich lebende Organismen ohne Hilfe fortpflanzen, während mechanische Ob-

GLOSSAR

Replikation findet statt, wenn ein (natürliches oder künstliches) System ein zweites Exemplar seiner selbst herstellt. Die Fachleute unterscheiden die (genaue) Replikation von der Reproduktion, bei der die Kinder sich von den Eltern unterscheiden dürfen.

Zellulärer Automat: eine Anordnung von „Zellen“ (typischerweise im Rechteckgitter), die verschiedene Zustände annehmen können. In diskreten Zeitschritten ändert sich der Zustand jeder Zelle nach deterministischen Regeln in Abhängigkeit vom eigenen Zustand und dem ihrer unmittelbaren Nachbarn.

Leere Zelle: der „Grundzustand“ der Zelle eines zellulären Automaten. Leere Zellen bleiben zumindest so lange leer, wie ihre Umgebung leer ist.

Element eines zellulären Automaten: eigentlich nur ein nicht-leerer Zustand einer Zelle. Gedanklich schreibt man Elementen ein Eigenleben zu; so können sie „wandern“, wenn kraft einer Regel der Zustand in einen anderen Zustand übergeht und zugleich in einer benachbarten Zelle neu entsteht.



Wenn ein Apfel einen Apfel „produziert“, dann sicher nicht mit einem Zeichengerät. Die Fortpflanzung von Maschinen aber muss genau so funktionieren: Erst baut die Maschine einen Kopierer, dann dupliziert sie damit ihren eigenen Bauplan.

DAVID EMMITE

jekte von Menschen konstruiert werden müssen? Wie ergibt sich die Replikation aus den unzähligen Wechselbeziehungen zwischen Gewebe, Zellen und Molekülen in einem Organismus? Wie konnte die Evolution im Darwin’schen Sinne die Selbstreplikation begünstigen oder überhaupt erst entstehen lassen?

Diese Fragen sind nicht nur von philosophischem Interesse. Erste Antworten führten bereits zur Entwicklung sich selbst reparierender Siliziumchips. Nanotechnologie-Forscher weisen seit jeher darauf hin, dass ihre nur wenige Moleküle großen Maschinen sich im Wesentlichen selbst zusammenbauen müssen: Eine Maschine, die eine Nanomaschine zusammenschraubt, wäre ihrerseits eine Nanomaschine, was das Konstruktionsproblem nur verlagern würde. Verfechter einer Besiedlung des Weltraums stellen sich als Vorhut Roboter vor, die – etwa auf dem Mars – unter Verwendung lokaler Materialien weitere Roboter herstellen. Jüngste Fortschritte lassen diese futuristischen Ideen glaubhaft klingen.

Wie in der Gentechnik, der Kernenergie und der Großchemie hat die Forschung zweierlei Probleme zugleich zu lösen: Die Selbstvermehrung von Maschinen muss funktionieren, und es ist zu verhindern, dass sie außer Rand und Band gerät.

Sciencefiction-Romane stellen die Selbstvermehrung einer Maschine gerne als natürliche Fortentwicklung der heutigen Technik dar, verschweigen aber das entscheidende Problem: Wie vermeidet man den unendlichen Regress? Nehmen wir an, ein System sei in der Lage, mittels eines Bauplans, das heißt einer Beschreibung seiner selbst, eine perfekte Kopie von sich herzustellen. Der Bauplan darf zwar physisch kleiner sein als das gesamte System, muss aber dessen gesamte Information enthalten.

Der Bauplan des Bauplans

Offensichtlich ist dieser Bauplan Teil des Systems und muss daher mit repliziert werden. Ein Teil der Beschreibung des Systems, nämlich die Beschreibung des Bauplans, müsste also mindestens so viel Information enthalten wie die Beschreibung des Gesamtsystems. Wie kann das sein? Anders gefragt: Was ist der Bauplan des Bauplans? Und was der Bauplan des Bauplans des Bauplans?

Es ist so, als müsste ein Architekt eine perfekte Kopie seines Büros bauen lassen, mit Hilfe eines Bauplans, der ebenfalls im Architekturbüro steckt. Der Bauplan müsste eine Miniaturversion des Bauplans enthalten, welcher wiederum eine Minikopie des Bauplans enthält, und so weiter. Ohne diese Information wäre es unmöglich, das Büro bis ins Kleinste nachzubauen; es bliebe eine leere Stelle dort, wo der Bauplan war.

Von Neumanns große Leistung bestand darin, einen Ausweg aus dem unendlichen Regress zu finden. Er erkannte, dass die Selbstbeschreibung eines Systems doppelt genutzt werden kann: erstens als Anleitung zur Herstellung einer identischen Kopie des Systems, und zweitens als Daten, die unverändert kopiert und dem neuen System mitgegeben werden, sodass es ebenfalls die Fähigkeit zur Selbstreplikation erhält. Dank diesem Zwei-Phasen-Prozess braucht die Selbstbeschreibung keine Beschreibung ihrer selbst zu enthalten. In unserem Beispiel würde der Bauplan des Architekturbüros eine Bauanleitung für ein Kopiergerät enthalten. Sobald das neue Büro und der Kopierer gebaut sind, würden die Bauarbeiter einfach eine Kopie der Baupläne herstellen und im neuen Büro ablegen.

Genau diesen doppelten Gebrauch machen lebende Zellen von ihrer Selbstbeschreibung (ihrem Genom), die in Form von DNA im Zellkern abgelegt ist: Erstens wird die DNA als Bauplan zur Herstellung von Proteinen verwendet; zweitens wird sie bei der Zellteilung unverändert kopiert und je ein Exemplar den Tochterzellen mitgegeben. Von Neumann erkannte dieses Prinzip, noch be- ▶

vor den Biologen die Rolle der DNA klar war, und seine Ergebnisse gaben ihnen entscheidende Denkanstöße.

Um seine Ideen zu demonstrieren, entwickelten von Neumann und der Mathematiker Stanislaw M. Ulam das Konzept des (zweidimensionalen) zellulären Automaten. Es handelt sich um ein beliebig ausgedehntes Schachbrett. Jedes seiner Felder (jede „Zelle“) ist entweder leer oder befindet sich in einem von mehreren möglichen Zuständen. Mit jedem Ticken einer gedachten Uhr ändert sich der Zustand einer jeden Zelle in Abhängigkeit von ihrem bisherigen Zustand und dem ihrer Nachbarn. Diese Zustandsänderung folgt einigen relativ einfachen Regeln, die für alle Zellen gleich sind. Die Regeln bilden die Naturgesetze dieser Primitivwelt.

Zelluläre Automaten

Wie in der echten Welt sind alle Wechselwirkungen lokaler Natur: Eine Zelle wird nur von dem beeinflusst (erhält nur Information über das), was sich in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft abspielt. Weit voneinander entfernte Zellen können nur vermittels der dazwischen liegenden Zellen aufeinander einwirken.

Die scheinbare Einfachheit zellulärer Automaten trügt: Ihr Verhalten ist alles andere als langweilig. Der berühmteste unter ihnen, John Horton Conways „Spiel des Lebens“ (*game of life*) vom Anfang der siebziger Jahre (SdW 11/1998, S. 112), erzeugt erstaunlich komplexe Muster. Viele Aussagen über das Verhalten zellulärer Automaten sind formal nicht entscheidbar; das heißt, es gibt keinen kürzeren Weg, ein Muster der Zukunft vorherzusagen, als das Verhalten explizit zu simulieren (vergleiche die Diskussion von Langtons Ameisen in SdW 8/1995, S. 10, 9/1995, S. 12 und 10/1995, S. 10). Auf

Bauen Sie Ihre eigene vermehrungsfähige Maschine

Ein Schachbrett bietet ausreichend Lebensraum für eine kleine, selbstreplizierende Schleife.

Das hier vorgestellte Modell ist ein zellulärer Automat mit vier verschiedenen Elementen: Bauern, Springer, Läufer und Türme. Genauer: Jede Zelle kann leer sein oder einen von sieben verschiedenen Zuständen annehmen, die „Bauer“, „Turm“, „Läufer“ und viermal „Springer“ heißen, denn beim Springer kommt es darauf an, in welche Richtung er blickt; das ist in den Diagrammen die Richtung, in die seine Schnauze weist. Die im Schachspiel üblichen Zugregeln spielen hier keine Rolle.

Zu Anfang besteht die Maschine aus vier Bauern, einem Springer und einem Läufer. Sie hat zwei Teile: die Schleife selbst, die aus einem 2×2 Felder großen Quadrat besteht, und den Konstruktionsarm („Ausleger“) auf der rechten Seite.

Die Selbstbeschreibung besteht aus dem Springer und dem Läufer. Der Springer bestimmt die Richtung, in der die Maschine ihre Knospen treibt, während der Läufer für die Größe der Schleife verantwortlich ist. Die Bauern sind Platzhalter für die freien Plätze in der Schleife, und der Turm ist ein kurzlebiges Signal, das die Konstruktion eines neuen Auslegers einleitet.

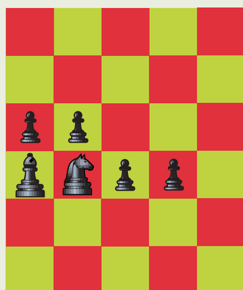
Im Verlaufe der Zeit durchlaufen durch die Wirkung der Regeln (siehe rechts) der Springer und der Läufer die Schleife entgegen dem Uhrzeigersinn. Sowie sie am Ausleger ankommen, verdoppelt sich das Läufer-Springer-Paar. Ein Exemplar wandert am Ausleger entlang und erzeugt im Laufe der Zeit (siehe unten) eine komplette Maschine, während das Original weiter die Schleife durchläuft.

Verwenden Sie zweckmäßig zwei Schachbretter, eines für den aktuellen Zustand und das andere für den Aufbau des folgenden. Setzen Sie auf jedes Feld des zweiten Bretts eine Figur – oder auch gar keine – gemäß den Spielregeln; dabei kommt es auf den Zustand des entsprechenden Feldes auf dem ersten Brett und seiner vier unmittelbaren Nachbarfelder an. Wenn keine der (rechts aufgeführten) Regeln zutrifft, bleibt das Feld unverändert. Randfelder werden behandelt, als hätten sie leere Nachbarfelder außerhalb des Brettes.

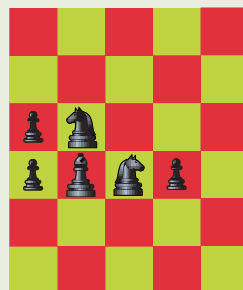
Wenn Sie für jedes Feld des zweiten Bretts den neuen Zustand aufgebaut haben, ist der Zug zu Ende. Räumen Sie das erste Brett ab, schieben Sie das zweite Brett an die Stelle des ersten und umgekehrt, und beginnen Sie von neuem. Da die Regeln kompliziert sind, braucht es am Anfang ein wenig Geduld. Sie können sich auch die Simulation (unter Windows oder Unix) als Animation ansehen: *lslwww.epfl.ch/chess.*

Stufen der Selbstreplikation

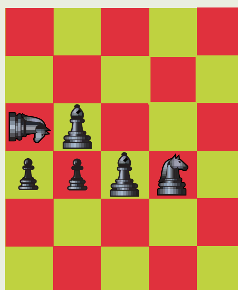
Zu Beginn steht die Selbstbeschreibung – das Genom –, bestehend aus einem Springer und einem Läufer, am Ansatzpunkt des Auslegers.



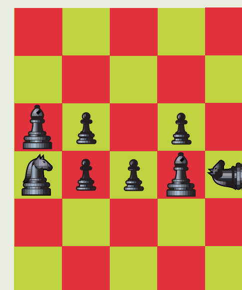
1 Der Springer und der Läufer wandern entgegen dem Uhrzeigersinn die Schleife entlang. Eine Kopie des Springers wandert den Arm entlang.



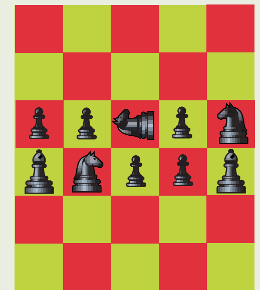
2 Das ursprüngliche Springer-Läufer-Paar umläuft weiter die Schleife, und eine Kopie des Läufers folgt dem Springer am Arm entlang hinaus.



3 Der Springer erzeugt zwei Ecken der Tochterschleife. Der Läufer folgt hinterdrein, womit das Erbgut vollständig übertragen ist.



4 Der Springer bildet die letzte Ecke der Tochterschleife. Beide Schleifen sind durch den Ausleger und einen neu entstandenen (den „wilden“) Springer verbunden.

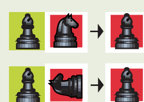


seine Weise kann ein zellulärer Automat so komplex sein wie die echte Welt.

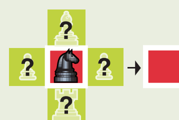
Insbesondere gibt es in der Welt der zellulären Automaten so etwas wie Fortbewegung. Es kommt nämlich vor, dass ein Muster wandert, das heißt nach einer gewissen Zahl von Zeitschritten in genau derselben Gestalt wieder erscheint, nur um ein paar Felder in irgendeiner Richtung versetzt. Wie in der klassischen Mechanik bewegt sich das Muster in der Folge dann geradlinig und gleichförmig fort, bis es auf ein Hindernis trifft.

Was bedeutet nun Selbstvermehrung in der Welt eines zellulären Automaten? Wir haben die Freiheit, eine beliebige Gruppe von Zellen als eine „Maschine" aufzufassen. Wenn nun der Lauf der Welt, sprich die deterministische Zeitentwicklung des Automaten nach den Regeln, dazu führt, dass in der näheren Umgebung einer Maschine eine exakte Kopie von ihr entsteht und sie selbst in den Ursprungszustand zurückkehrt, dann hat sie sich offensichtlich selbst repliziert. Von Neumann hatte theoretisch eine solche Maschine in seinem zellulären Automaten entworfen. Sie enthielt ihrerseits eine Maschine, den *Universal Constructor*, der mit einer geeigneten Folge von Anweisungen jedes beliebige Muster herstellen kann. Der Constructor bestand aus verschiedensten Bauteilen, die sich über zehntausende Zellen erstreckten und deren Definition ein Manuskript in Buchlänge erforderte. Wegen seiner Komplexität ist er bis heute nie vollständig simuliert, geschweige denn gebaut worden. Ein Constructor in der Welt des „Game of Life" wäre noch komplizierter, da Funktionen, die in von Neumanns Modell von einer einzigen Zelle ausgeführt werden – darunter Signalübertragung und Herstellung neuer Bauteile –, nun ganze Zellkomplexe erfordern würden.

Die Regeln

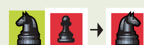


Springer: Wenn sich links von oder hinter ihm ein Läufer befindet, ersetze den Springer durch einen Läufer.

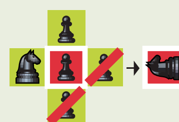


➤ Ansonsten entferne den Springer, falls mindestens eines seiner Nachbarfelder besetzt ist.

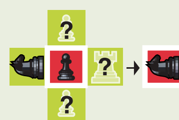
Bauer: Befindet sich auf einem Nachbarfeld ein Springer, so ersetze den Bauern durch einen Springer:



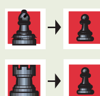
➤ Schaut der Nachbarspringer weg vom Bauern, so zeigt der neue Springer in die entgegengesetzte Richtung.



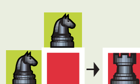
➤ Anderenfalls: Wenn es genau einen benachbarten Bauern gibt, schaut der neue Springer ihn an.



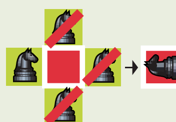
➤ Anderenfalls schaut der neue Springer in die gleiche Richtung wie das Original.



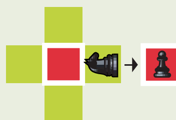
Läufer und **Türme** werden durch Bauern ersetzt.



Leeres Feld: Befinden sich zwei Springer auf den Nachbarfeldern, und mindestens einer schaut auf das leere Feld, setze einen Turm dorthin.



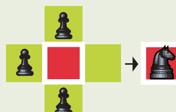
➤ Wenn nur ein Springer auf den Nachbarfeldern ist und dieser auf das leere Feld schaut, setze einen Springer hinein, dessen Blickrichtung gegenüber dem anderen um neunzig Grad gegen den Uhrzeigersinn gedreht ist.



➤ Befindet sich nur ein Springer auf den Nachbarfeldern, hat dieser das leere Feld zur Linken und sind alle anderen Felder leer, so setze einen Bauern.

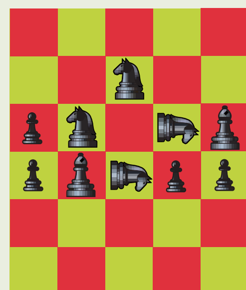


➤ Befindet sich ein Turm auf den Nachbarfeldern und sind alle anderen Felder leer, so setze ebenfalls einen Bauern.

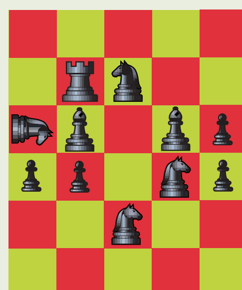


➤ Befinden sich genau drei Bauern auf den Nachbarfeldern, so setze einen Springer, der zum vierten, leeren Nachbarfeld schaut.

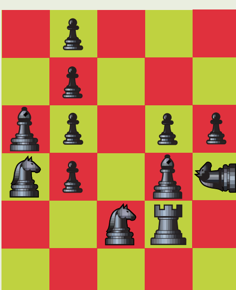
5 Der wilde Springer zieht aufwärts, um das Original mit einem neuen Arm zu versehen. Mit einem Zeittakt Verzögerung spielt sich das Gleiche in der Tochterschleife ab.



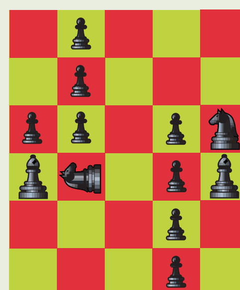
6 Während der alte Arm verschwindet, erzeugt der wilde Springer mit dem ursprünglichen Springer-Läufer-Paar einen Turm.



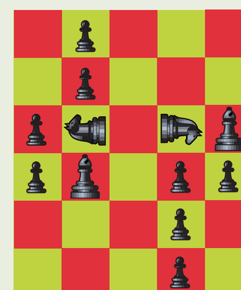
7 Der Turm schlägt den wilden Springer und erzeugt den neuen, nach oben gerichteten Arm. Ein zweiter Turm schickt sich an, das Gleiche in der Tochterschleife zu tun.



8 Schließlich sind beide Schleifen getrennt und vollständig. Die Selbstbeschreibungen kreisen weiter, ansonsten ist aber alles ruhig.



9 Die Elternschleife bereitet sich auf eine neue Geburt vor, und im nächsten Schritt beginnt auch die Tochterschleife, sich fortzupflanzen.



GEORGE RETSECK

Am anderen Ende der Komplexitätsskala ist es sehr einfach, Beispiele für Selbstreplikation zu finden. Eines wäre ein zellulärer Automat, dessen Zellen außer dem leeren Zustand nur einen anderen kennen; nennen wir ihn „+“. Das Naturgesetz ist ebenfalls sehr einfach: Wenn unter den vier Nachbarn einer Zelle genau ein + ist, dann wird sie ebenfalls +; ansonsten wird sie leer. Ein einsames + auf weiter Flur wird im ersten Zeitschritt zu vier identischen Nachkommen, die in den folgenden Zeitschritten ebenfalls Nachwuchs bekommen, und so weiter.

Die Pluszeichen wachsen zwar wie Unkraut; gleichwohl würde man kaum von Selbstreplikation reden, da es keine nennenswerte Maschine gibt. Was aber unterscheidet eine „nennenswerte“ Maschine von einer Gruppe Zellen, die sich nur deshalb vermehrt, weil das schon in

Roboter, heile dich selbst !

Sich selbst reparierende Computer bilden die ersten Anwendungen von künstlicher Fortpflanzung.

Ein Forscher schätzt es in der Regel nicht, wenn sein Gerät mutwillig zerstört wird. Daniel Mange aber ist es gerade recht, wenn Besucher an einer seiner Schöpfungen den dort angebrachten „Kill“-Knopf drücken. Im Mai vergangenen Jahres stellte seine Arbeitsgruppe ihr jüngstes Werk auf einer Wissenschaftsmesse der Öffentlichkeit vor und lud die Besucher ein, das System nach Kräften zu beschädigen.

Mange will elektronische Schaltkreise mit der Fähigkeit ausstatten, trotz einiger Schrammen weiter zu funktionieren, wie Kreaturen aus Fleisch und Blut eben. Die Genauigkeit und Geschwindigkeit digitaler Hardware mit der gesunden Robustheit organischen Gewebes – das ist eins der Traumziele der modernen Elektronik.

Fehlertolerante Schaltkreise sind nichts Neues. Das Space Shuttle hat sogar fünf Prozessoren, von denen vier die gleichen Berechnungen ausführen, während der fünfte kontrolliert, ob die Ergebnisse übereinstimmen, und jeden Abweichler abschaltet. Allerdings stehen und fallen diese Systeme mit der zentralen Kontrollinstanz. Was passiert, wenn diese ausfällt?

Mutter Natur hat dieses Problem durch radikale Dezentralisierung gelöst. Unsere Körperorgane bestehen aus lauter im Wesentlichen gleichen Zellen; jede von ihnen erfüllt ihre spezielle Aufgabe eigenständig und begeht Selbstmord im Falle einer Infektion oder ihres Versagens, sodass neue Zellen ihre Aufgaben übernehmen können. Mit genau diesen Qualitäten will Professor Mange von der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne elektronische Schaltkreise ausstatten. Sein seit 1993 laufendes Projekt heißt „Embryonics“ wie embryonale Elektronik.

Eine seiner ersten Erfindungen ist eine künstliche Zelle namens Mictree (*microinstruction tree*, „Mikro-Befehlsbaum“). In einem knapp streichholzschachtelgroßen Plastikgehäuse stecken ein einfacher Prozessor und ein Vier-Bit-Register. Mit elektrischen Kontakten an den Seiten können die Zellen wie Legosteine zusammengesteckt werden. Wie in den zellulären Automaten stehen die Mictree-Zellen nur mit ihren vier unmittelbaren Nachbarn in Kontakt.

Die Zellen folgen den Anweisungen ihres „Genoms“ – eines kleinen Programms in der Programmiersprache Pascal. Wie ihre biologischen Vorbilder enthält jede Zelle das gleiche Genom. Sie führt aber nur einen gewissen Teil davon aus, der von ihrer Position im Gesamtsystem bestimmt wird. Diese Position errechnet die Zelle durch Verständigung mit ihren unmittelbaren Nachbarn. Es gibt weit mehr Zellen als nötig; aber dank dieser Verschwendung kann das System den Tod einzelner Zellen verkraften. Wenn jemand den „Kill“-Knopf drückt, schaltet die Zelle sich ab, und ihr linker Nachbar wird direkt mit dem rechten verbunden. Letzterer berechnet seine Position neu und übernimmt damit die Arbeit seines verstorbenen Kollegen. Seine eigenen Aufgaben werden von der Zelle zur Rechten übernommen, die ihrerseits ihre Position neu berechnet hat, und so weiter, bis eine zuvor inaktive Reservezelle in den Dienst gestellt wird.

Wie bei jedem Parallelrechner ist auch bei dem Mictree-Gitter die Gesamtaufgabe geschickt in Teilaufgaben für die einzelnen Zellen zu zerlegen. Als echter Schweizer wählte Mange als Gesamtaufgabe, die Zeit anzuzeigen – eine Stoppuhr mit besonderer Zuverlässigkeit. Die Darstellung von Minuten und Sekunden erfordert vier Zellen, eine pro Ziffer. Das Genom hält Anweisungen für zwei Zelltypen bereit: einen Zähler von null bis neun für die Einer und einen von null bis fünf für die Zehner. Ein Oszillator sendet einen Puls pro Sekunde in die äußerste rechte Zelle. Diese zählt für jeden Puls eins hoch; nach dem zehnten Puls setzt sie sich auf null zurück und sendet einen Impuls zu ihrem linken Nachbarn. Der zählt bis sechs, setzt sich zurück, schickt dabei einen Impuls nach links und so weiter.

Die Uhr lebt auf zwölf in einer Reihe zusammengesteckten Zellen; wenn eine Zelle stirbt, verschiebt sich die Uhr entsprechend und arbeitet weiter. Natürlich ist die Robustheit auch dieser Uhr begrenzt; wie die sprichwörtliche Katze hat sie nur neun Leben.



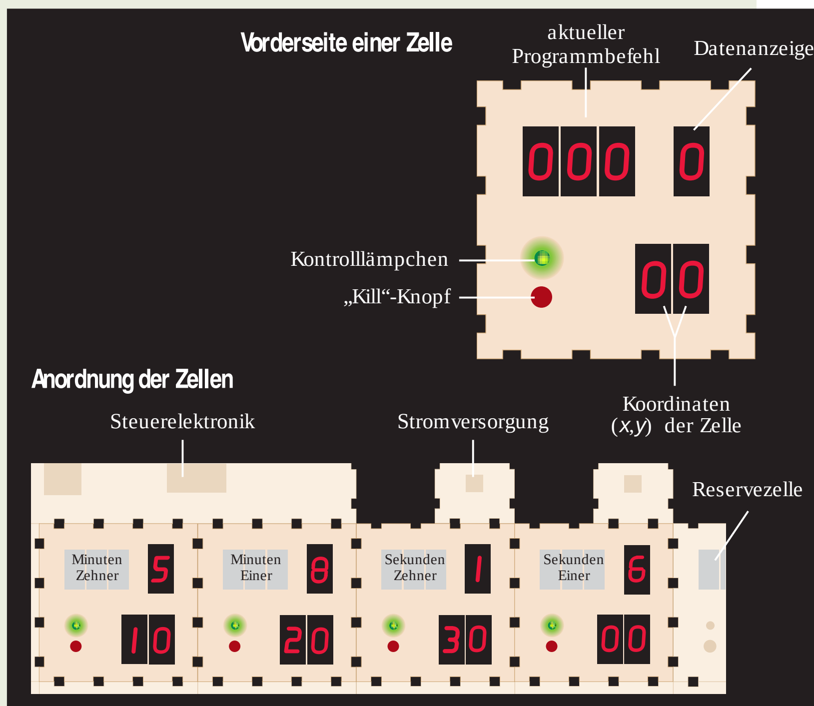
Diese besonders stoßfeste Schweizer Uhr besteht aus einfachen Prozessoren (den „Zellen“) in Rechteckanordnung. Jede Zelle zählt eine Ziffer hoch, von 0 bis 9 oder 5, je nach ihrer Position in der Anordnung. Fällt eine Zelle aus, so teilen automatisch die Nachbarzellen die Arbeit neu unter sich auf, wobei sie eine Reservezelle in den Dienst nehmen.

den „Naturgesetzen“ steckt? Bisher weiß niemand darauf eine gute Antwort. Offensichtlich muss jedoch die Kopiervorrichtung eine gewisse minimale Komplexität aufweisen. So muss sie aus mehreren verschiedenen Komponenten bestehen, deren Zusammenwirken den Replikationsprozess ablaufen lässt: das sprichwörtliche Ganze, das mehr ist als die Summe seiner Teile. Eine dieser Komponenten muss die Selbstbeschreibung sein, die innerhalb der vermehrungsfähigen Struktur abgelegt ist.

Seit von Neumanns bahnbrechender Arbeit haben viele Forscher das weite Feld zwischen dem Komplexen und dem Trivialen erkundet. Ein großer Schritt in Richtung einer Vereinfachung gelang 1984 Christopher G. Langton an der Universität von Michigan in Ann Arbor. Er bemerkte, dass schleifenförmige Speicher, die bereits in früheren selbstre-

Die Zellen des Prototyps Mictree sind noch fest verdrahtet und daher nur sehr beschränkt verwendbar. In einem kommerziellen Produkt würde man stattdessen ein *field-programmable gate array* (FPGA) verwenden, eine Anordnung elektronischer Bauelemente, deren Verschaltung im laufenden Betrieb geändert werden kann (Spektrum der Wissenschaft 8/1997, S. 44). Manges Arbeitsgruppe entwickelt zurzeit ein Gate Array namens Muxtree (*multiplexer tree*), das für künstliche Zellen optimiert ist. Im biologischen Bild sind dessen Komponenten die Moleküle, aus denen die Zelle aufgebaut ist. Jedes „Molekül“ besteht aus einem Logikgatter, einem Datenbit und einer Reihe von Konfigurationsbits, welche die Funktion des Gatters festlegen.

Dieses Bauprinzip bietet nicht nur Flexibilität, sondern auch zusätzliche Robustheit. Jedes Molekül enthält zwei Exemplare des Gatters und drei des Datenbits. Wenn die beiden Gatter unterschiedliche Ergebnisse liefern, schaltet sich das Molekül zum Wohle der gesamten Zelle ab. Mit seinem letzten Atemzug sendet es sein Datenbit (welches durch dreifache Speicherung gesichert ist) und seine Konfiguration an den rechten Nachbarn. Der übernimmt die Aufgabe, tritt seinen eigenen Job an seinen rechten Nachbarn ab und so weiter, bis sich ein Reservemolekül findet. Diese zweite Stufe der Fehlertoleranz verhindert, dass ein einziger Fehler die gesamte Zelle unbrauchbar macht.



Zweitausend „Moleküle“ in vier Zellen der Größe 20×25 bilden „BioWall“ – die riesige digitale Uhr, die Manges Team kürzlich vorführte. Jedes Molekül sitzt in einem kleinen Gehäuse mit einem „Kill“-Knopf und einer Leuchtanzeige. Einige Moleküle führen Berechnungen aus, andere bilden die Pixel, aus denen die Ziffernanzeige zusammengesetzt ist. Ich gab mir alle Mühe, das System durch eifriges Betätigen von Knöpfen abstürzen zu lassen – was mir normalerweise auf Anhieb gelingt. Die hartnäckige Uhr aber hielt eisern durch. Ihre Ziffern sahen zwar zum Teil etwas verzerrt aus, wenn einzelne Leuchtpixel nach rechts auswanderten, aber sie waren immer noch lesbar, im Gegensatz zu den meisten defekten elektronischen Anzeigen.

Die gleichwohl noch auftretenden Defekte schreibt Mange Synchronisationsfehlern zu. Die Rechenleistung ist zwar dezentralisiert, aber die Kommunikation findet synchron nach den Vorgaben eines zentralen Taktgebers statt, und manchmal kommen Zellen aus dem Takt. Ein Team unter der Leitung von Andy Tyrell von der Universität York (England) experimentiert mit Zellen, die wie ihre biologischen Vettern asynchron arbeiten. Spezielle Signale (*handshake*) dienen zur Eröffnung und zur Beendigung einer Kommunikation. Mit einigen Fehlern kommt das System im gegenwärtigen Zustand noch nicht zurecht, darunter fehlerhafte Konfigurationsbits. Tyrells Team denkt an den Einsatz von Aufpassermolekülen – ein Immunsystem, das unter anderem die Konfigurationen auf Defekte überprüft.

Diese Systeme erfordern zwar großen Materialaufwand, aber das trifft auch auf andere fehlertolerante Systeme zu. Außerdem sollte es nicht allzu schwer sein, einen Muxtree auf die Größenordnung von Nanometern zu verkleinern. Seine „Moleküle“ sind einfach genug, um durch echte Moleküle realisierbar zu sein. Mange sagt: „Wir bereiten uns darauf vor, dass die Elektronik sich in der gleichen Größenordnung abspielt wie die Biologie.“

Vom philosophischen Standpunkt kommt Embryonics dem Traum von der selbstreplizierenden Maschine besonders nahe. Es ist zwar nicht ganz so dramatisch wie ein Roboter, der im Elektronikfachgeschäft Bauteile einkauft und sie sich zu Hause anlötet, oder der sich einen liebenden Partner nach seinen Vorstellungen zusammenbastelt. Im Endeffekt läuft es aber auf das Gleiche hinaus. Ob die Maschinen ihre Chips umprogrammieren oder mit neuronalen Netzen oder genetischen Algorithmen neues, ungeahntes Wissen erwerben – allein die Vorstellung, sie könnten ihr Schicksal selbst bestimmen, klingt Angst einflößend. Vielleicht sollten wir eher darüber freuen, dass die Maschinen uns immer ähnlicher werden: unvollkommen, fehlbar, aber auch mit robuster Kreativität.

George Musser

Der Autor ist unvollkommener, aber kreativer Redakteur bei Scientific American.

Literaturhinweise

Towards Robust Integrated Circuits: The Embryonic Approach. Von D. Mange et al. in: Proceedings of the IEEE, Bd. 88, Nr. 4, S. 516, 2000.

Von Neumann's Legacy: On Self-Replication. Von M. Sipper et al. (Hg.). Sonderheft von Artificial Life, Bd. 4, Nr. 3, 1998.

Emergence of Self-Replicating Structures in a Cellular Automata Space. Von H. Chou und J. Reggia in: Physica D, Bd. 110, Nr. 3–4, S. 252, 1997.

Simple Systems That Exhibit Self-Directed Replication. Von J. Reggia et al. in: Science, Bd. 259, Nr. 5099, S. 1282, 26. Februar 1993.

Self-Reproducing Machines. Von Lionel S. Penrose in: Scientific American, Juni 1959, S. 105.

*Weblinks bei **www.spektrum.de** unter „Aktuelles Heft"*

plizierenden Maschinen enthalten waren, so programmiert werden können, dass sie sich selbst fortpflanzen.

Solche Speicher bestehen gewöhnlich aus zwei Teilsystemen: der Schleife selbst, das ist eine Reihe von Elementen, die den Rand eines rechteckigen Gebiets entlangwandern, und einem Konstruktionsarm (dem „Ausleger"), der von einer Ecke des Rechtecks nach außen ragt. Die wandernden Elemente enthalten Anweisungen für ihre eigene Fortbewegung in der Schleife. Sowie sie den Konstruktionsarm erreichen, werden sie durch die Wirkung der Regeln dupliziert. Das Original wandert weiter durch die Schleife, während die Kopie durch den Ausleger geht, wo sie als Folge von Anweisungen interpretiert wird.

Selbstreplizierende Schleifen

Indem Langton im Gegensatz zu von Neumann nicht darauf bestand, dass seine Maschinen jedes geforderte Muster herstellen können, gelang ihm die Konstruktion eines Replikators aus sieben Komponenten in nur 86 Zellen. Einer von uns (Reggia) hat mit unseren Kollegen sogar noch kleinere und einfachere selbstreplizierende Schleifen gebaut (Kasten Seite 28/29). Da sie aus mehreren wechselwirkenden Komponenten bestehen und eine Selbstbeschreibung enthalten, sind sie nicht trivial. Erstaunlicherweise spielt Asymmetrie eine unerwartete Rolle: Die Regeln, welche die Vermehrung steuern, können oft einfacher gehalten werden, wenn die Komponenten nicht rotationssymmetrisch sind.

Alle diese selbstreplizierenden Strukturen wurden mit viel Fantasie und Herumprobieren konstruiert. Dies ist ein mühevoller und oftmals frustrierender Prozess: Kleine Änderungen in den Regeln führen zu einem vollkommen verschiedenen globalen Verhalten – meist zur Zerstörung der aufwendig konstruierten Struktur. Neuere Arbeiten schlagen daher einen anderen Weg ein. Statt die Regeln für das Funktionieren eines bestimmten Maschinentyps zurechtzubasteln, spielen die Forscher „Schöpfer": Sie definieren verschiedene Naturgesetze, füllen ihre zellulären Automaten mit zufällig ausgewählten Elementen (der „Ursuppe") und warten ab, ob Selbstreplikatoren sich spontan herausbilden.

Hui-Hsien Chou, heute an der Staatsuniversität von Iowa, und Reggia bemerkten 1997, dass selbstreplizierende Schleifen regelmäßig erscheinen, wenn die Konzentration der freien Komponenten einen gewissen Schwellenwert überschreitet. Kollidierende Schleifen vernichten sich gegenseitig, sodass sich ein stetes Wechselspiel von Geburt und Tod ergibt. Im Laufe der Zeit vermehren sich manche Schleifen, wachsen und mutieren unter dem Einfluss von Bruchstücken früherer Zusammenstöße. Obwohl die Automatenregeln deterministisch sind, können diese Mutationen wegen der Komplexität des Systems und der zufälligen Anfangspositionen der Elemente als zufällig angesehen werden.

Solche Schleifen sind zwar als abstrakte Maschinen gedacht und nicht als Modell für etwas Biologisches; gleichwohl ist es interessant, sie mit molekularbiologischen Strukturen zu vergleichen. Eine Schleife hat eine gewisse Ähnlichkeit mit der ringförmigen DNA eines Bakteriums und der Konstruktionsarm mit dem Enzym, das deren Replikation katalysiert. Überzeugender ist der Vergleich auf einer abstrakteren Ebene: Einfache lokale Wechselwirkungen können zu komplexem globalem Verhalten führen. Die Bestandteile zellulärer Automaten scheinen einem klassischen Spruch der Alternativen zu folgen: Lokal handeln – global denken. Im weitesten Sinne trifft dies auch auf die Molekularbiologie zu.

In einem neueren Computerexperiment variierten Jason Lohn, inzwischen am Ames-Forschungszentrum der Nasa, und Reggia statt der Strukturen die Regeln. Es gelang ihnen, zu jedem zufällig gewählten Block aus vier Komponenten Regeln zu finden, unter denen sich dieser Block selbst repliziert. Diese Regeln fanden sie mit einem Optimierungsverfahren, das der Evolution nachempfunden ist: einem genetischen Algorithmus (SdW 9/1992, S. 44).

Evolution zur besten aller möglichen Welten

Wie jedes Optimierungsverfahren soll auch dieses eine Struktur (in diesem Falle die Regeln) so variieren, dass sie eine gegebene Anforderung (hier die Replikationsfähigkeit) optimal erfüllt. Ein genetischer Algorithmus lässt stets mehrere Exemplare dieser Struktur gegeneinander konkurrieren, verwirft die ungeeigneten und entwickelt die geeigneten weiter, durch Mutation und eine Art „Kreuzung", bei der die Eigenschaften beider Partner gemischt werden. Nur: Was ist in diesem Falle ein brauchbarer Maßstab für Eignung (*fitness*)? Die Replikationsfähigkeit selbst kann es nicht sein, da wohl kaum eine der konkurrierenden Strukturen von Anfang an darüber verfügt. Es ist dasselbe Problem, das sich auch den Evolutionsbiologen stellt: Wenn erst eine voll ausgebildete Fähigkeit einen Selektionsvorteil bringt, aber keine ihrer Vorformen: Wie kann dann die Evolution die Entstehung dieser Fähigkeit begünstigen?

Für unser pseudobiologisches Problem fanden wir schließlich ein geeignetes Fitnessmaß. Es bestand in der gewichteten Summe dreier Kenngrößen:

➤ eine unspezifische Vermehrungsrate: das Ausmaß, in dem jeder Elementtyp mehr von seinesgleichen hervorbringt;

➤ ein Maß für den Zusammenhalt: das Ausmaß, in dem benachbarte Elemente



über mehrere Zeitschritte hinweg zusammenbleiben; und

➤ ein Maß für die Anzahl der tatsächlich vorhandenen Replikatoren, das heißt selbstreplizierenden Teilstrukturen.

Mit der richtigen Fitnessfunktion kann die „Evolution“ eines genetischen Algorithmus in ungefähr 150 Generationen aus unfruchtbaren Regelsystemen fruchtbare machen. Wohlgemerkt: Es sind nicht die Strukturen selbst, die der Evolution unterworfen sind, sondern ganze Welten mit ihren jeweils eigenen Naturgesetzen.

Die so gefundenen Replikatoren funktionieren auf völlig neue Art. Sie wandern und legen unterwegs Kopien ihrer selbst ab, anders als die in der Regel ortsfesten replizierenden Schleifen. Sie bestehen aus mehreren lokal wechselwirkenden Komponenten, enthalten jedoch keine abgrenzbare Selbstbeschreibung, kein „Genom“. Genau das, nämlich Vermehrung ohne abgrenzbares Genom, müssen die frühen Vorformen des Lebens auch bewerkstelligt haben. Insofern studieren wir in unseren künstlichen Welten ein Zwischending zwischen Belebtem und Unbelebtem.

Viele Forscher haben sich neben den traditionellen zellulären Automaten an anderen mathematischen Modellen versucht. In asynchronen zellulären Automaten ändern die Zellen ihren Zustand nicht nach einem zentralen Zeittakt; in nichtuniformen Automaten gelten an verschiedenen Plätzen verschiedene Regeln. Ein völlig anderes Konzept steckt hinter dem „Krieg der Kerne“ (*core war*, vergleiche SdW 1/1993, S. 10) und seinen Nachfolgern, wie dem System „Tierra“ des Ökologen Thomas S. Ray. Die „Organismen“ in diesen Computersimulationen sind Programme, die um Speicherplatz und Rechenzeit konkurrieren. Ray beobachtete die Herausbildung von „Parasiten“, Computerviren in einem sehr direkten Sinne, die sich des Replikationscodes anderer Organismen bemächtigen.

Aus der virtuellen in die echte Welt

Was hat man nun von diesen Maschinen? Von Neumanns *Universal Constructor* ist zwar außer zur Vermehrung auch zum Rechnen fähig, aber doch ein unhandliches Monster. Die Entwicklung einfacherer, dennoch nützlicher Replikatoren war daher ein großer Fortschritt. Gianluca Tempesti von der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne vereinfachte 1995 die Selbstbeschreibung einer Schleife, sodass sie mit einem kleinen Programm verschachtelt werden konnte – das in diesem Falle den abgekürzten Namen seines Institutes LSL (Logic Systems Laboratory) in den zellulären Automaten schreibt. Er erfand Regelsysteme, unter denen sich eine Schleife in zwei Schritten vermehrt. Wie Langtons Vorbild stellt sie zunächst eine Kopie von sich her. Die Tochterschleife sendet danach ein Signal zur Mutter, woraufhin diese ihre Arbeit verrichtet, nämlich die drei Buchstaben zu schreiben.

Im folgenden Jahr entwickelten Jean-Yves Perrier, Jacques Zahnd und einer von uns (Sipper) eine selbstreplizierende Schleife mit der Fähigkeiten einer universellen Turing-Maschine – ein äußerst primitiver, aber voll funktionstüchtiger Computer. Unsere Maschine arbeitet mit zwei „Bändern“, das sind lange Ketten von Elementen, von denen eine das Programm, die andere die Daten enthält. Die Schleifen können sowohl beliebige Programme ausführen als auch sich selbst replizieren. In gewissem Sinne sind sie so komplex wie der Computer, der den ganzen zellulären Automaten und damit auch die Schleifen simuliert. Ihre wesentliche Beschränkung besteht darin, dass das Programm unverändert in die Tochterschleife kopiert wird, sodass alle Schleifen dasselbe tun.

Chou und Reggia überwanden 1998 auch diese Schranke. Sie zeigten, wie selbstreplizierende Schleifen mit individuell verschiedenen Informationen anstelle geklonter Programme zur Lösung des so genannten Erfüllbarkeitsproblems eingesetzt werden können: Gesucht sind Werte für die Variablen eines logischen Ausdrucks (das heißt einer Formel, die diese Variablen mit den logischen Operationen „und“, „oder“ und „nicht“ auf beliebig komplizierte Weise verknüpft), sodass der gesamte Ausdruck den Wert „wahr“ erhält. Dieses Problem ist NP-vollständig, das heißt, es gehört zusammen mit dem Rundreiseproblem (*travelling salesman problem*) zu einer Gruppe schwieriger Probleme, für die keine effiziente Lösung bekannt ist. In Chous und Reggias Automatenuniversum erhält jeder Replikator einen anderen Kandidaten für eine Lösung. Während des Replikationsprozesses mutieren diese Lösungsversuche; Replikatoren mit viel versprechenden Lösungen dürfen sich fortpflanzen, während die Versager aussterben.

Einige Forscher haben sogar zelluläre Automaten in elektronischer Hardware gebaut, statt sie zu simulieren, aber für praktische Zwecke ist das ein viel zu hoher Materialaufwand; dafür waren sie auch nie gedacht. Ihr Zweck ist vielmehr, die der Replikation zu Grunde liegenden Prinzipien herauszuarbeiten und dadurch zu konkreteren Anstrengungen zu inspirieren.

Eine Arbeitsgruppe der Nasa unter Leitung von Robert Freitas jr. schlug 1980 vor, auf dem Mond eine selbstreplizierende Fabrik zu installieren, die unter Verwendung von Mondmaterial ein großes Gebiet mit immer größerer Geschwindigkeit besiedelt. Eine ähnliche Sonde könnte die gesamte Galaxie bevölkern, argumentiert der Physiker Frank J. Tipler von der Tulane-Universität in New Orleans, der durch seine „Physik der Unsterblichkeit“ Aufsehen erregt hat. Hod Lipson von der Cornell-Universität und Jordan B. Pollack von der Brandeis-Universität haben mit Primitiv-Robotern experimentiert, die ihre eigenen Nachkommen – bis zu einem gewissen Grade – selbst zusammenbauen. Diese Systeme sind zwar nicht selbstreplizierend im eigentlichen Sinne, da der Nachwuchs viel einfacher gebaut ist als die Eltern; dennoch kommt man mit ihnen der eingangs erwähnten Forderung der schwedischen Königin schon näher.

Sowie selbstreplizierende physikalische Maschinen technisch möglich werden, gewinnt auch die Horrorvorstellung von den künstlichen Kreaturen, welche die natürlichen verdrängen, an Realität. Wir ziehen das optimistischere und plausiblere Szenario vor, in welchem die Replikatoren zum Wohle der Menschheit eingesetzt werden. Als der englische Philosoph William von Ockham im 14. Jahrhundert empfahl: *entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem* – „Wesenheiten sind nicht über das Notwendige hinaus zu vermehren“, meinte er mit *entia* zwar eher theoretische Konzepte; aber bezogen auf unsere fruchtbaren Roboter sollten wir seine Empfehlung gleichfalls beherzigen. ■



Moshe Sipper *ist Professor am Fachbereich Informatik der Ben-Gurion-Universität in Beer-Sheva (Israel) und Gastwissenschaftler am Logic Systems Laboratory (LSL) der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL). Er interessiert sich für Computer, deren Konzept durch biologische Vorbilder inspiriert ist.*



James A. Reggia *ist Professor für Informatik und Neurologie am Institute for Advanced Computer Studies der Universität von Maryland in College Park. Außer über Selbstreplikation forscht er über Computermodelle des Gehirns und seiner Schädigungen, besonders des Schlaganfalls.*

Die Herren der Ringe

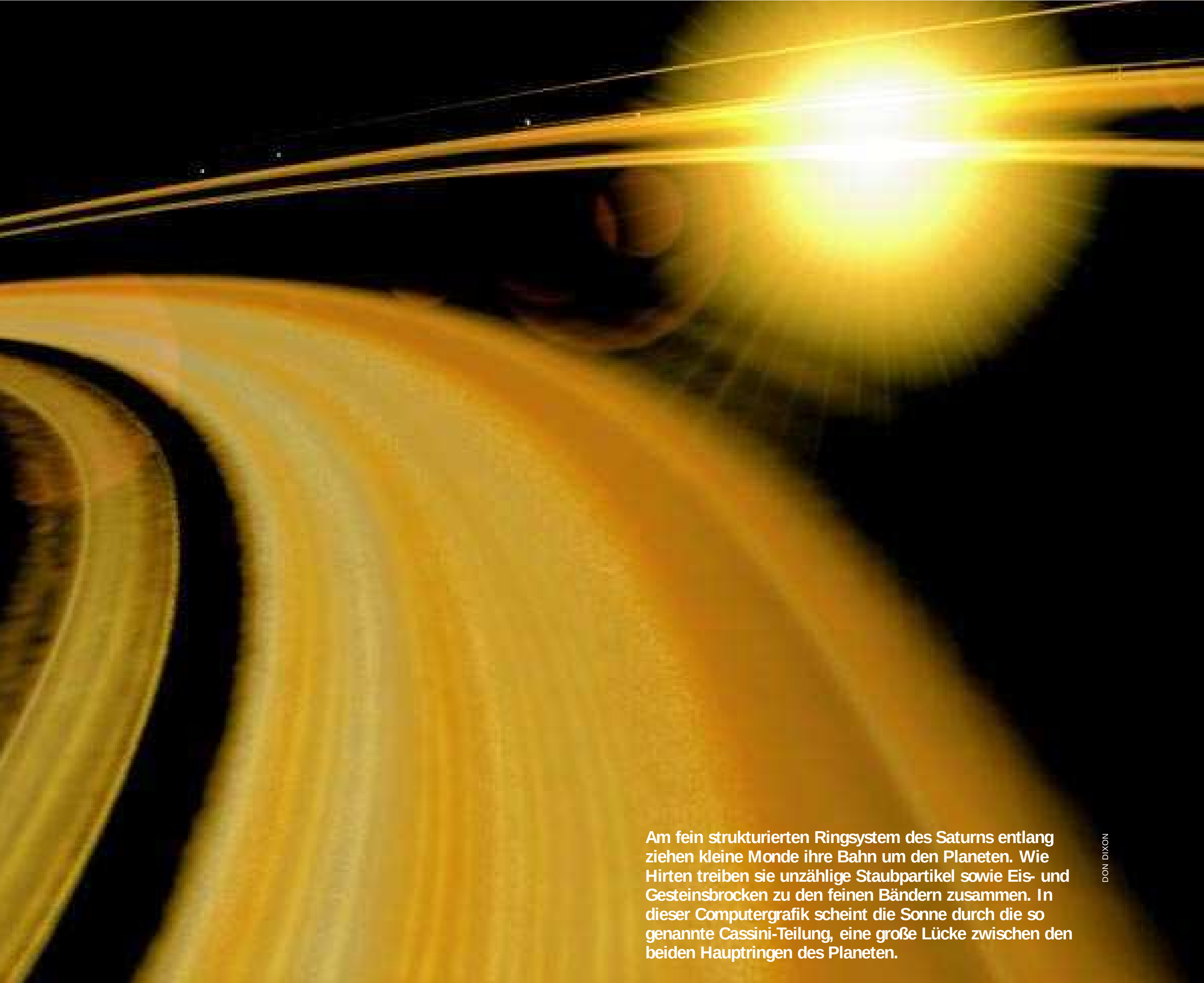
Sie sind nur wenige hundert Meter dick, aber viele zehntausend Kilometer breit: die Ringe des Saturns und anderer Riesenplaneten. Allmählich enträtseln die Astronomen, welch komplexes Wechselspiel der Schwerkraft diese fein strukturierten Gebilde geformt hat.

Von Joseph A. Burns, Douglas P. Hamilton und Mark R. Showalter

Ein Großteil der modernen Weltwirtschaft basiert auf Erfindungen, die der Begründer des Elektromagnetismus und Pionier der Thermodynamik James Clerk Maxwell (1831–1879) ermöglicht hat. Von einem anderen Lieblingsthema des britischen Physikers kann man solch ökonomischen Nutzen nicht behaupten: den Ringen des Saturns. Doch deswegen sind sie nicht weniger attraktiv. Anlässlich der Verleihung des Adams-Preises der Universität Cambridge, den er für die mathematische Beschreibung der Saturnringe erhielt, schrieb Maxwell im Jahre 1857:

Es gibt Fragen in der Astronomie, die ziehen uns … wegen ihrer Merkwürdigkeit an … und nicht, weil ihre Lösung einen direkten Nutzen für die Menschheit hätte … Mir ist kein praktischer Nutzen der Saturnringe bekannt …, aber wenn wir die Ringe von einem rein wissenschaftlichen Standpunkt aus betrachten, dann werden sie zu den bemerkenswertesten Objekten am Firmament, abgesehen vielleicht von jenen noch unnützeren Gebilden, den Spiralgalaxien … Wenn wir mit eigenen Augen diesen großen Bogen gesehen haben, der sich über dem Äquator des Planeten spannt, ohne jede sichtbare Verbindung, dann kann uns das keine Ruhe lassen.

Selbst anderthalb Jahrhunderte später bleiben die Saturnringe ein Symbol für all die exotischen und erstaunlichen Objekte im Kosmos. Je genauer die Beobachtungen wurden, desto mehr ist ihr Zauber noch gestiegen. Die Entdeckungen der vergangenen zwei Jahrzehnte haben unser Wissen derart erweitert, dass sozusagen ein völlig neues Ringsystem



Am fein strukturierten Ringsystem des Saturns entlang ziehen kleine Monde ihre Bahn um den Planeten. Wie Hirten treiben sie unzählige Staubpartikel sowie Eis- und Gesteinsbrocken zu den feinen Bändern zusammen. In dieser Computergrafik scheint die Sonne durch die so genannte Cassini-Teilung, eine große Lücke zwischen den beiden Hauptringen des Planeten.

DON DIXON

enthüllt worden ist – viel komplexer und interessanter, als Theorie, Beobachtung und Fantasie vermuten ließen.

Auch die anderen Riesenplaneten in unserem Sonnensystem haben Ringe. Aber keiner gleicht dem anderen. Ringe sind seltsame Gebilde, selbst nach den Maßstäben der Astronomie. Sie werden von subtilen Prozessen geformt, die manchmal der Intuition widersprechen. Während zum Beispiel die Schwerkraft normalerweise materielle Körper anzieht, kann sie in einem Ringsystem durchaus abstoßend wirken. Wir wissen heute, dass Ringe keineswegs statisch sind, sondern dass sie sich beständig weiterentwickeln. Wir haben die fundamentale Wechselwirkung zwischen Monden und Ringen erkannt. Vor allem haben wir gelernt, dass Planetenringe eigentlich keine ausgefallenen Phänomene sind: Wie Maxwell sehen auch die heutigen Wissenschaftler Parallelen zwischen Ringen und Galaxien. Im Grunde genommen können Ringe sogar einen Blick in die Frühzeit des Sonnensystems erlauben.

Dreieinhalb Jahrhunderte lang waren nur die Ringe des Saturns bekannt. Galileo Galilei (1564–1642) hatte sie 1610 bei seinen ersten Himmelsbeobachtungen mittels Fernrohrs als seitliche Ausbuchtungen des Planeten entdeckt. Der holländische Gelehrte Christiaan Huygens (1629–1695) interpretierte sie fünf Jahrzehnte später als planetenumspannenden Reifen. Erst 1977 fanden die Astronomen ein weiteres Ringsystem: James L. Elliot, damals an der Cornell-Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York), überwachte die Helligkeit eines Sterns, als die kleine Scheibe des Uranus davor herzog, und sah das Signal immer wieder auftauchen und verschwinden. Er schloss daraus, dass eine Reihe schmaler Bänder, etwas elliptisch oder geneigt, den Planeten umgeben (siehe „Die Ringe des Uranus“, Spektrum der Wissenschaft 9/1987, S. 96). Innerhalb von nur sieben Jahren wurden dann auch um die beiden anderen Riesenplaneten Ringe entdeckt: 1979 sichtete die Raumsonde Voyager 1 die durchsichtigen Ringe des Jupiters, und 1984 wurde mit einer Technik ähnlich der von Elliot ein filigranes Ringsystem um Neptun nachgewiesen.

Mitte der 90er Jahre schließlich gelangen neue Durchbrüche durch Beobachtungen mit dem Hubble-Weltraumteleskop und modernen Großteleskopen auf der Erde sowie durch Messungen der Raumsonde Galileo, die in eine Umlaufbahn um Jupiter einschwenkte (siehe „Jupiter und seine Monde“, Spektrum der Wissenschaft 4/2000, S. 40). Saturns ▶

lichtschwächste Ringe und Monde wurden 1995 und 1996 sichtbar, als man von der Erde aus das Ringsystem genau von der Kante sah und die Hauptringe nicht mehr blendeten. Weitere Fortschritte sind durch die Raumsonde Cassini zu erwarten, die im Juli 2004 ihre mindestens vierjährige Erkundung des Saturnsystems beginnen wird.

Zwar unterscheiden sich die vier bekannten Ringsysteme im Detail, aber sie haben auch viele Gemeinsamkeiten. Sie sind alle fein strukturiert und bestehen aus zahlreichen konzentrischen Ringen, die oft durch unterschiedlich breite Lücken getrennt sind. Jeder Ring enthält unzählige Partikel aus Gestein und Eis, die den zentralen Planeten umkreisen, während sie sanft aneinander stoßen.

Welche Kräfte zwingen Myriaden von Partikeln in geordnete Bahnen?

Anhand der Teilchendichte unterscheidet man grob zwei Kategorien von Ringen. Als Maß für die Dichte dient dabei die optische Tiefe, welche die exponentielle Dämpfung des senkrecht durchtretenden Lichts beschreibt. Die dichtesten Ringe – wie die A und B genannten Hauptringe Saturns und die mit griechischen Buchstaben und Nummern bezeichneten Uranusringe – haben eine optische Tiefe bis 4. Dies bedeutet, dass nur etwa zwei Prozent des Lichts hindurchdringen ($e^{-4} = 0{,}0183$). Die Teilchengröße in diesen dichten Ringen reicht von wenigen Zentimetern bis zu einigen Metern.

In einem solch dichten Ring stoßen die Partikel oft mehrere Male während eines Umlaufs um den Planeten zusammen. Dabei geht Energie verloren, und Drehimpuls wird umverteilt. Weil Teilchen näher am Planeten eine größere Umlaufgeschwindigkeit haben als solche weiter außen, bremsen Kollisionen die inneren Teilchen ab, die dann Richtung Planet fallen, während sie die äußeren anschubsen, die sich dann weiter vom Planeten wegbewegen. Deshalb breiten sich Ringe im Laufe der Zeit in radialer Richtung aus. Sie verhalten sich dabei wie eine zähe Flüssigkeit. Im Falle von Saturn ist die effektive kinematische Viskosität der Ringe mit derjenigen von Luft vergleichbar.

Der Energieverlust und die Umverteilung des Drehimpulses sorgen folglich für eine Abplattung eines dichten Ringsystems. Was auch immer die ursprüngliche Gestalt gewesen sein mag: Das System zerfließt rasch zu einer dünnen Scheibe, die praktisch genau in der Äquatorebene des Planeten liegt. Saturns Ringe zum Beispiel sind nur einige Dutzend Meter dick, obwohl sie sich radial über mehrere hunderttausend Kilometer erstrecken. Das Verhältnis von Dicke und Ausdehnung ist etwa so wie bei einem Blatt Seidenpapier von der Größe eines Fußballfeldes. Ein ähnlicher Effekt flacht auch Materiescheiben um Sterne und die Gasscheiben von Spiralgalaxien ab.

Eine weitere Folge hoher Partikeldichte ist die Verstärkung der gegenseitigen Schwereanziehung der Teilchen: Vielleicht sind die Uranusringe deswegen nicht rund, weil ihre Selbstgravitation sie daran hindert, sich zu einem kreisförmigen Band zu verschmieren.

Das andere Extrem sind die feinsten bekannten Ringe wie die des Jupiters oder die äußersten des Saturns: Sie haben optische Tiefen von 10^{-8} bis 10^{-6}. Die Partikel sind so weit voneinander entfernt, dass sie nur selten zusammenstoßen und die Ringe daher nicht zu flachen Scheiben zerfließen. Aus der Art, wie sie Licht streuen, wissen wir, dass diese Ringe aus sehr feinem Staub bestehen. Mit Durchmessern um ein Mikrometer sind diese Partikel ungefähr so groß wie diejenigen in Zigarettenrauch. Deshalb werden sie außer von der Schwerkraft auch stark von elektromagnetischen Kräften und vom Strahlungsdruck beeinflusst, was zu ungewöhnlichen dynamischen Effekten führt.

Das Ringsystem des Planeten Neptun passt nicht in dieses grobe Schema; seine optische Tiefe liegt zwischen den beiden erwähnten Extremen. Es fällt noch in anderer Hinsicht aus dem Rahmen: Der dichteste Ring ist kein glattes Band, sondern enthält einzelne bogenförmige Verdichtungen, so genannte *arcs*, die zusammen weniger als ein Zehntel des Umfangs ausmachen. Ohne einen Mechanismus, der sie zusammenhält, würden sie sich innerhalb eines Jahres um den ganzen Planeten ausbreiten. Doch Beobachtungen mit dem Hubble-Weltraumteleskop und vom Erdboden aus zeigten, dass die Bögen sich innerhalb von 15 Jahren nur unwesentlich verändert haben.

Alle dichten Ringsysteme befinden sich nahe an ihren Planeten, nicht weiter entfernt als die so genannte Roche-Grenze: Innerhalb dieser Zone sind die Gezeitenkräfte des Planeten so stark, dass sie die einzelnen Partikel hindern, sich zu größeren Körpern zusammenzuballen. Knapp außerhalb der Roche-Grenze gibt es einen Bereich, wo kleine, unregelmäßig geformte Monde gemeinsam mit Ringen vorkommen können. Einige der seltsamsten Eigenschaften der Ringe dürften durch die Wechselwirkung mit diesen Monden verursacht sein.

Unter dem Einfluss der Monde

Saturns E-Ring zum Beispiel erfüllt eine breite Zone, die auch die Monde Mimas, Tethys, Dione und Rhea umfasst, und genau dort, wo der glatte Eismond Enceladus umläuft, ist der Ring am hellsten. Der schmale F-Ring aus mehreren klumpigen Fäden liegt isoliert knapp außerhalb des A-Rings und wird von zwei weiteren Monden – Pandora und Prometheus – begleitet. Solche auffälligen Zusammenhänge zwischen Umlaufbahnen von Trabanten und Ringstrukturen gibt es auch bei Jupiter, Uranus und Neptun.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten haben die Astronomen einiges darüber gelernt, welche Kräfte die Monde auf die Ringe ausüben. Demnach scheinen drei grundlegende Prozesse die Ringstrukturen zu beeinflussen:

- Bahnresonanzen,
- direkte Beeinflussung der Teilchenbahnen und
- das Ausstoßen und Aufsammeln von Material.

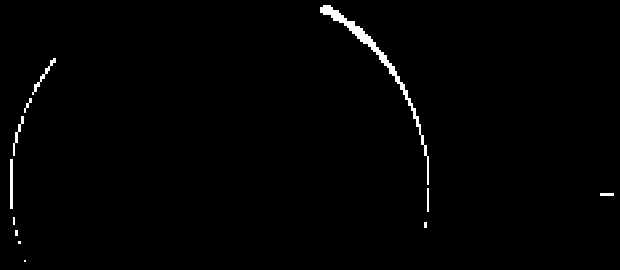


ESO

Eine der besten Aufnahmen des Planeten Saturn von der Erde aus gelang im Dezember 2001 dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte. Eingesetzt wurde ein neuer Detektor mit adaptiver Optik.

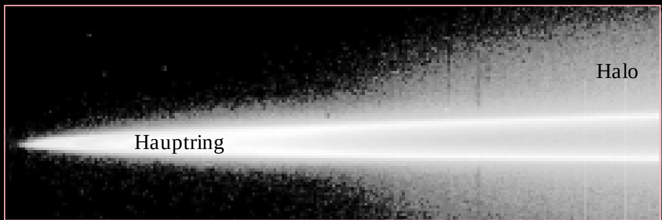
Jupiter

Zart besaiteter Gigant: Der größte Planet im Sonnensystem ist von feinen Ringen umgeben. Die Partikel darin sind kleiner als bei den anderen Riesenplaneten und in einer relativ dicken Scheibe verteilt.



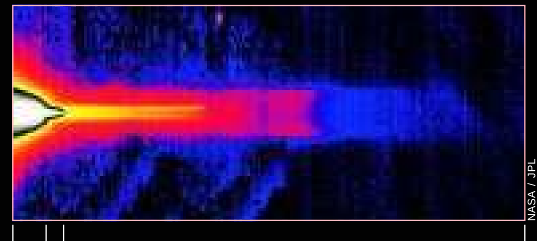
Aus Aufnahmen der Raumsonde Galileo wurde dieses Bild des Jupiters im Gegenlicht zusammengesetzt. Das gestreute Sonnenlicht hebt die äußeren Atmosphärenschichten des Planeten und die zarten Ringe hervor.

Vom Innenrand des Hauptrings ausgehend erstreckt sich ein dünner aufgeblähter Halo um das Ringsystem.



NASA / JPL

Außerhalb von Halo und Hauptring (weiße Zonen) liegen die feinen „Gossamer"-Ringe (farbkodiert).



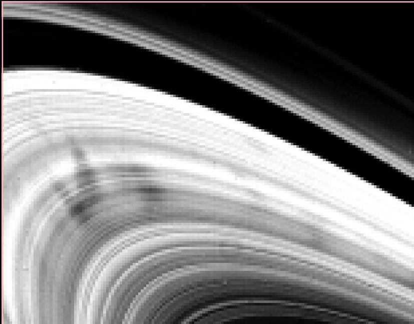
NASA / JPL

Halo
Hauptring
Gossamer-Ringe
Metis
Adrastea
Amalthea
Thebe

DON DIXON

Saturn

Das auffällige Ringsystem des Saturns erscheint umso feiner strukturiert, je genauer die Wissenschaftler hinsehen. Ab 2004 wird die Cassini-Raumsonde noch feinere Details fotografieren können.



NASA / JPL

B-Ring • Zwischen der Vielzahl einzelner Ringe tauchen mitunter „Speichen“ auf, die durch Staubteilchen erzeugt werden.



DON DIXON

A-Ring • In mindestens zwei Zonen haben Monde, wie hier künstlerisch dargestellt, die metergroßen Fels- und Eisbrocken weggeräumt.



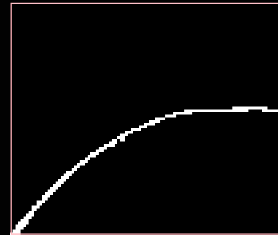
NASA / JPL

C-Ring • Die zarten Farbunterschiede zwischen dem C-Ring (blau) und dem B-Ring (gold) sind hier verstärkt dargestellt.



NASA / JPL

Encke-Teilung • Der kleine Mond Pan erzeugt diese Lücke im Ringsystem.



NASA / JPL

F-Ring • Mehrere Stränge sind durch die Schwerkraft zweier Monde verdrillt.

D
G
E
Epimetheus
Janus
Pandora
Pan
Atlas
Prometheus
Encke-Teilung
Cassini-Teilung
Mimas

DON DIXON

Betrachten wir zunächst die Bahnresonanzen. Die Wirkung der Schwerkraft wird verstärkt, wenn die Umlaufzeiten von einem Ringteilchen und einem Mond ein ganzzahliges Verhältnis aufweisen (sagen wir, $m:n$). So ist ein Teilchen am Außenrand des B-Rings des Saturns in einer 2:1-Resonanz mit Mimas, denn es läuft genau doppelt so schnell um den Planeten wie dieser Mond. Der Außenrand des A-Rings wiederum ist in einer 7:6-Resonanz mit den Monden Janus und Epimetheus.

Teilchenbahnen in der Nähe von solchen Resonanzen werden besonders stark gestört, weil sich die Anziehungskraft der Monde hier in periodischen Abständen bemerkbar macht, wodurch sich die Wirkung aufschaukelt. In der Regel sind Resonanzen am stärksten auf Bahnen nahe der des entsprechenden Mondes, aber bei zu geringer Entfernung überlagern sich mehrere Resonanzen, und die Bewegungen werden chaotisch. Die stärksten Resonanzen gibt es, wenn $m=n+1$ ist (zum Beispiel 2:1 oder 43:42). Ihre Stärke nimmt schnell ab, je mehr sich m und n unterscheiden. Im ausgedehnten Ringsystem Saturns entsprechen nur wenige Dutzend Ringpositionen starken Resonanzen mit Monden.

Die Folgen solcher resonanten Störungen sind unterschiedlich. Starke Resonanzen entfernen Material aus der zugehörigen Umlaufbahn, was die scharfen Außenränder der A- und B-Ringe Saturns erklärt. Manchmal entstehen sogar Lücken. Solch eine Resonanz könnte für die unregelmäßigen Ringe Neptuns verantwortlich sein. Ähnliche Resonanzen erklären auch die Verteilung der Materie im Asteroidengürtel unseres Sonnensystems, wobei die Sonne die Rolle des Zentralkörpers und Jupiter die eines großen Trabanten innehat.

Anderswo in Saturns A-Ring erzeugen Resonanzen Wellen. Wenn die Bahn des Mondes elliptisch ist, entsteht eine Spiralwelle, gewissermaßen eine Miniaturausgabe unseres spiralförmigen Milchstraßensystems. Ist die Mondbahn zur Äquatorebene des Planeten geneigt, resultiert das in einer Abfolge vertikaler Verbiegungswellen, wodurch eine Art Wellblechmuster in der ansonsten platten Scheibe entsteht.

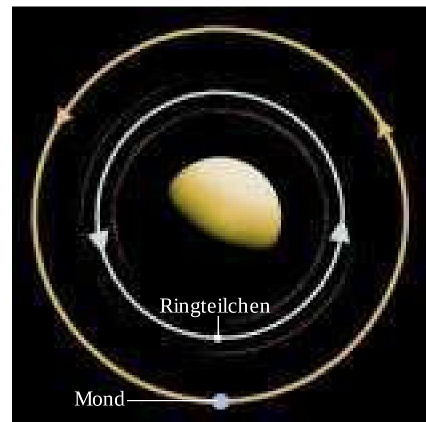
Resonanzen gehen zwar meist auf die Gravitation von Monden zurück, aber im Prinzip können sie von jeder sich regelmäßig wiederholenden Kraft erzeugt werden – seien es Unregelmäßigkeiten im Schwerefeld des Planeten oder veränderliche elektromagnetische Kräfte. Das Jupiter-Ringsystem ist bekannt für solche Resonanzen. Bei einem Radius von 120 000 Kilometern bläht sich der flache Ring zum Planeten hin zu einem dicken Torus auf. Ein Ringteilchen in diesem Abstand läuft dreimal um den Jupiter, während sich dieser zweimal um seine Achse dreht. Das starke, zur Äquatorebene geneigte Magnetfeld des Riesenplaneten schubst die Teilchen immer wieder aus der Ebene. Noch näher an Jupiter, bei einem Radius von 100 000 km, fällt die Helligkeit des Rings stark ab. Das ist der Ort der elektromagnetischen 2:1-Resonanz: Teilchen, die in diese Zone driften, werden so weit im Raum verstreut, dass sie neben dem hellen Planeten schlicht nicht mehr zu sehen sind.

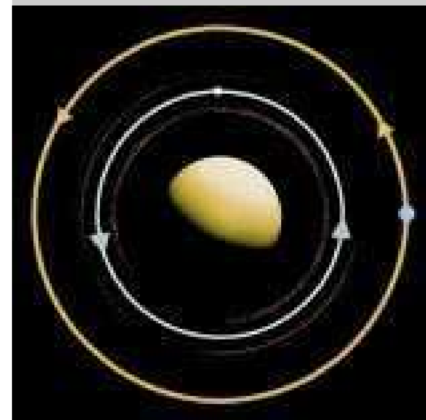
Nur scheinbar paradox: Schwerkraft stößt ab

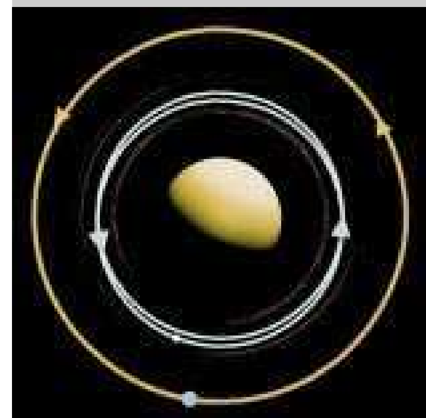
Kommen wir nun zur zweiten grundlegenden Wechselwirkung, der direkten Beeinflussung der Teilchenbahnen durch die Monde. Würden sich ein kleiner und ein großer Körper im ansonsten freien Raum begegnen (ohne zu kollidieren), dann liefe dieser Vorgang nach vertrautem Muster ab: Durch die Anziehungskraft zwischen beiden Körpern würde das kleine Partikel beschleunigen, am Mond vorbeihuschen und anschließend wieder abbremsen, bis seine Geschwindigkeit wieder dieselbe wäre wie zu Beginn. Nur seine Bewegungsrichtung hätte sich geändert. Oder physikalisch gesprochen: Der Streuvorgang wäre symmetrisch in Raum und Zeit, die Flugbahn des kleinen Teilchens eine perfekte Parabel oder Hyperbel.

In einem Ringsystem sind Mond und Teilchen jedoch nicht isoliert: Sie kreisen um ein drittes Objekt, den Planeten. Wer immer diesem näher ist, kreist den Gesetzen der Himmelsmechanik zufolge schneller. Nehmen wir einmal an, das Ringteilchen wäre das innere und schnellere. Während der nahen Begegnung schubst dann die Schwerkraft des Mondes das Teilchen auf eine neue Bahn. Dieses Ereignis ist asymmetrisch: Das Teilchen kommt dem Mond näher, und die Anziehung zwischen beiden steigt. Somit kann das Teilchen nicht mehr die Geschwindigkeit annehmen, die es vorher hatte – seine Bahnenergie und sein Bahndrehimpuls haben abgenommen. Die Teilchenbahn ist nun eine Ellipse innerhalb der ursprünglichen Kreisbahn. Durch Kollisionen mit anderen Partikeln im Ring wird das Teilchen zwar bald wieder eine kreisförmige Bahn annehmen; deren Durchmesser ist aber kleiner als vor der Begegnung mit dem Mond.

Insgesamt ist das Teilchen also nach innen geschoben worden – von einem Mond, der weiter außen kreist. Die





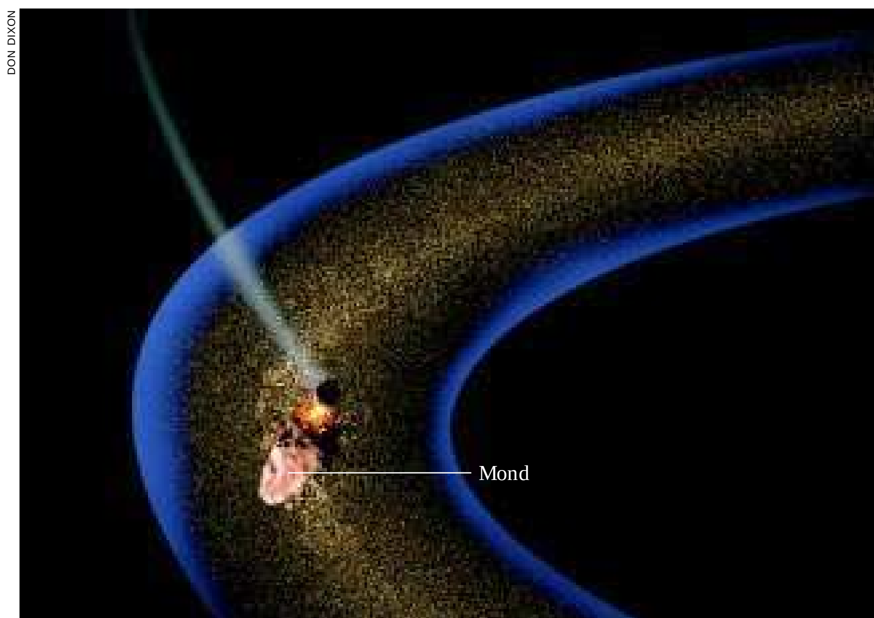


DON DIXON

Mond und Ringteilchen treten in Resonanz, wenn ihre Umlaufzeiten in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen. In diesem Fall läuft das Teilchen während eines Orbits des Mondes genau zweimal um den Planeten. Weil sich die Körper immer in derselben Position wieder begegnen, kann sich die Wirkung der Schwerkraft verstärken.

Bahnenergie, die das Teilchen verloren hat, hat der Mond gewonnen, doch wegen seiner viel größeren Masse wirkt sich das kaum aus. Vertauschen wir nun in Gedanken die Lage von Mond und Teilchen, so wechseln auch die Konsequenzen: Mit dem Mond auf der Innen-

DON DIXON



Durch Einschläge von Materiebrocken auf einem Mond splittert Material ab und verteilt sich ringförmig auf der Bahn des Trabanten. Andererseits fegt der Mond aber auch beständig Material auf. Das Zusammenspiel dieser beiden widerstreitenden Effekte bestimmt die Ausdehnung vieler Ringe.

bahn werden das Teilchen nach außen und der Mond (minimal) nach innen geschoben. In beiden Fällen scheint die Schwerkraft des Mondes das Ringmaterial *abzustoßen*, was unserer Intuition widerspricht. Doch keines der Naturgesetze ist verletzt. Das ungewohnte Ergebnis kommt durch die Wechselwirkung von zwei Körpern zu Stande, die sich im Orbit um einen dritten befinden und Energie verlieren. (Um aber kein Missverständnis aufkommen zu lassen: Dieser Effekt hat nichts mit einer abstoßenden Kraft, einer Art „Antischwerkraft" zu tun, die in neueren kosmologischen Theorien auftaucht.)

Wie die Resonanzen, so kann auch dieser Mechanismus Lücken in Ringen hervorrufen. Die Lücken dehnen sich so lange aus, bis die abstoßenden Kräfte des Mondes gerade durch die Tendenz der Ringe kompensiert werden, sich durch Kollisionen der Teilchen untereinander auszubreiten. Derartige Lücken gibt es bei Saturn sowohl in den A-, C- und D-Ringen als auch in Form der großen Cassini-Teilung, die den A- und den B-Ring voneinander trennt.

Derselbe Prozess vermag aber auch einen schmalen Ring zusammenzuquetschen. Ähnlich wie ein Hirt eine Schafherde zusammenhält, können Monde beiderseits eines Materiestrangs alle Teilchen zurückdrängen, die aus dem Strang zu entkommen suchen. 1978 schlugen Peter Goldreich und Scott D. Tremaine, damals beide am California Institute of Technology, einen solchen Mechanismus vor, um die rätselhafte Stabilität der Uranusringe zu erklären (siehe „Planetenringe", Spektrum der Wissenschaft 1/1982, S. 66). Die Monde Cordelia und Ophelia hegen auf diese Weise den Epsilon-Ring von Uranus ein. Saturns F-Ring wird offenbar von Prometheus und Pandora im Zaum gehalten.

Wie Hirten eine Schafherde, so halten Monde die Teilchen im Ring zusammen

Aber noch immer sind die meisten sichtbaren Lücken und schmalen Ringe – die *ringlets* – unerklärt. Vielleicht werden sie von Monden hervorgerufen, die mit heutiger Technik einfach noch nicht nachzuweisen sind. Der Cassini-Orbiter, eine Raumsonde, die am 1. Juli 2004 in eine Umlaufbahn um den Saturn einschwenken soll, wird vielleicht einige dieser verborgenen Dirigenten aufspüren können.

Noch ein weiterer Effekt der abstoßenden Schwerkraft kann Ringkanten mit einem wellenförmigen Muster versehen. Das ist am einfachsten aus Sicht des Mondes zu verstehen, an dem gewissermaßen ein steter Strom von Ringteilchen vorbeifließt. Wenn diese Partikel den Mond überholen, macht seine Schwerkraft aus ihren kreisförmigen Bahnen Ellipsen praktisch derselben Größe. Die Teilchen halten nun keinen konstanten Abstand mehr vom Planeten und scheinen sich – aus Sicht des Mondes – rhythmisch vor- und zurückzubewegen. Genauer gesehen ist es eine sinusförmige Bewegung mit einer Wellenlänge proportional zum Abstand zwischen den Orbits von Mond und Teilchen.

Die resultierende Welle liegt hinter dem Mond, wenn die Teilchen außerhalb kreisen und vor dem Mond, wenn die Teilchen näher am Planeten sind. Man könnte sie mit der Kielwelle eines Bootes in einem ungewöhnlichen Fluss vergleichen, in dem das Wasser auf einer Seite des Bootes schneller fließt als dieses selbst fährt. Einer von uns (Showalter) hat den gewellten Rand der Encke-Teilung Saturns untersucht und so den kleinen Hirtenmond Pan aufgespürt, der den Beobachtern bis dahin entgangen war. Ein anderes Beispiel ist der F-Ring, dessen periodische Klumpen von Prometheus eingeprägt wurden.

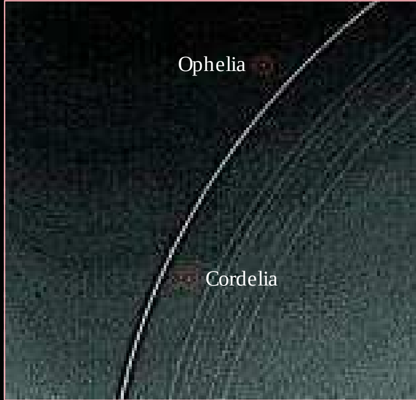
Der dritte und letzte Effekt von Monden auf die Ringstruktur ist das Ausstoßen und Aufsammeln von Material. Die Bedeutung, die dieser Mechanismus besonders für feine Staubringe hat, wurde erst durch die Galileo-Mission zum Jupiter erkannt. Die Voyager-Sonden hatten zwar bereits die Ringe und die beiden Monde Adrastea und Metis nahe am Außenrand des Hauptrings entdeckt. Aber die Bilder waren nicht scharf genug, um herauszufinden, was genau die Monde tun. Wirken sie wie Schafhirten, welche die Ringe an der Expansion nach außen hindern? Oder sind sie die Quelle von Ringmaterial, das langsam nach innen driftet? Auch konnten die Daten der Voyager-Raumsonden keine Erklärung für eine sehr filigrane äußere Fortsetzung der Ringe liefern, den so genannten Gossamer-Ring. (Das englische Wort *gossamer* bedeutet „feine Gaze".)

Die Aufnahmen der Galileo-Sonde zeigten, dass der Gossamer-Ring jenseits der Bahn des Mondes Amalthea abrupt aufhört. Und auf ihnen war ein zweiter, noch feinerer Gossamer-Ring zu erkennen, der genau bis zum Mond Thebe reicht. Nachdem einer von uns (Burns) diese Bilder gesehen hatte, ging ihm ein Licht auf: Die vertikale Ausdehnung des innersten Gossamer-Rings entspricht genau der Bahnneigung Amaltheas, und die Dicke des äußeren passt zu Thebes Bahnneigung. Außerdem sind beide Gossamer-Ringe an ihrem oberen und unteren Rand am hellsten, was auf einen Aufstau von Material hinweist – genau wie man ihn erwarten würde, wenn die Teilchen und die Monde dieselben Bahn- ►

Uranus

Ungewöhnlich an den Ringen des Uranus ist, dass die meisten von ihnen ellipsenförmig und leicht geneigt sind. Wie diese Besonderheiten zu Stande kommen, ist noch ungeklärt.

Die Monde Cordelia und Ophelia hegen den Epsilon-Ring ein.



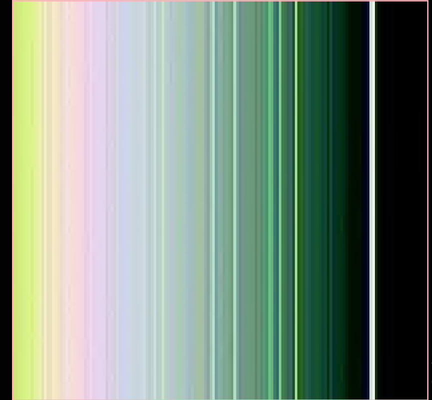
NASA / JPL

Die Voyager-2-Sonde entdeckte diffusen Staub zwischen den Ringen. (Die kurzen Strichspuren sind Hintergrundsterne.)

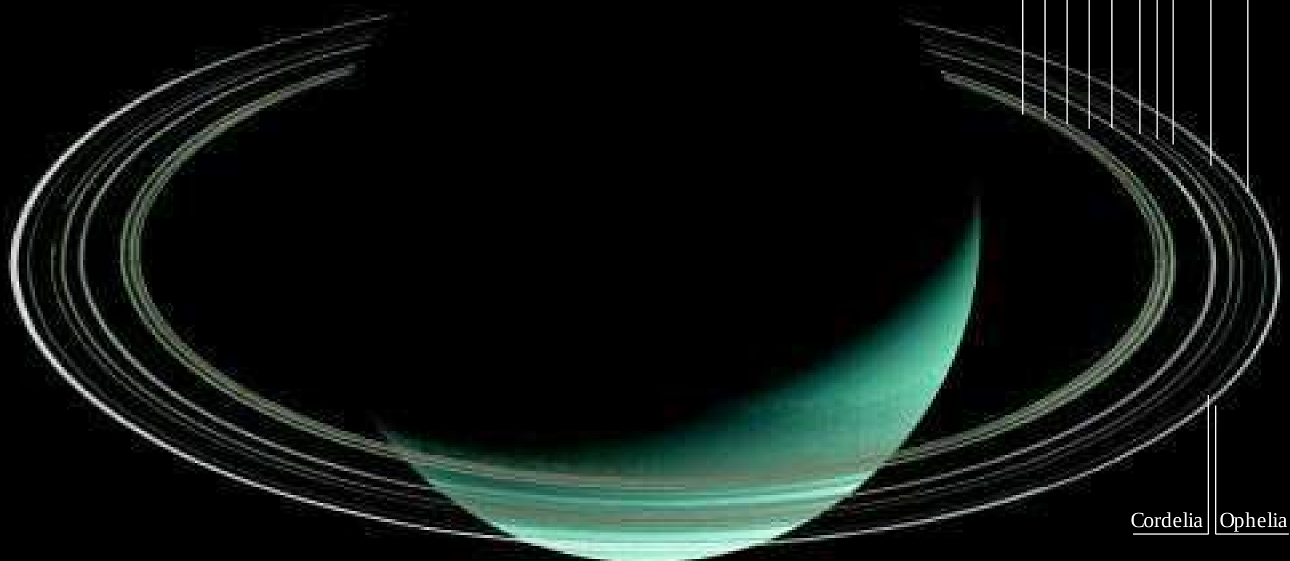


NASA / JPL

Diese Falschfarben-Aufnahme weist auf unterschiedliche Eigenschaften der Ringteilchen hin.



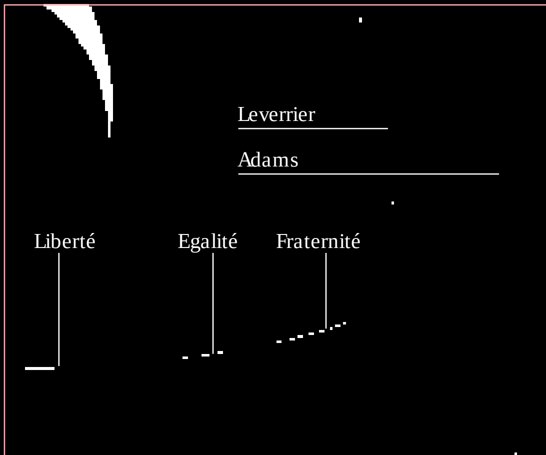
NASA / JPL



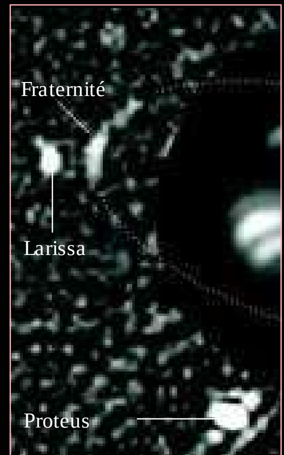
DON DIXON

Neptun

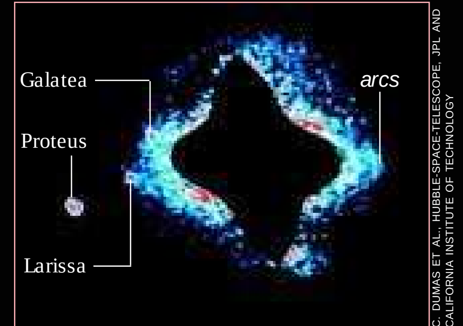
Die Ringe des Neptuns sind am wenigsten erforscht und verstanden. Der äußere Ring enthält Verdichtungen, so genannte *arcs*. Erst durch eine weitere Raumsonde wird man Genaueres erfahren können.



Voyager-Bilder von 1989 enthüllten Klumpen im äußeren Ring, die vielleicht durch Resonanzen mit noch unbekannten Monden zu Stande kommen.



1998 fotografierte das Hubble-Weltraumteleskop dieselben *arcs*; doch diese haben den Neptun etwas langsamer umlaufen als erwartet.



Auch in diesem computerbearbeiteten Bild, das von der Erde aus aufgenommen wurde, sind die *arcs* zu sehen.



neigungen haben. Dieser Zusammenhang lässt sich am einfachsten dadurch erklären, dass die Ringteilchen von den Monden absplittern, die ständig von interplanetaren Staubteilchen bombardiert werden.

Gerade kleine Monde erweisen sich als die besten Quellen: Zwar sind sie kleinere Ziele, aber das wird mehr als wettgemacht durch ihre geringere Schwerkraft – mehr Teilchen können von ihrer Oberfläche entweichen. Im Jupitersystem, so zeigen Berechnungen, sind zehn bis zwanzig Kilometer große Monde die effektivsten Quellen. Das ist just die Größe von Adrastea und Metis. Deshalb produzieren sie ausgeprägtere Ringe als Amalthea und Thebe, die viel größer sind.

Ringe um Planeten bilden sozusagen ein Sonnensystem en miniature

Ein merkwürdiges Gegenbeispiel ist allerdings der 500 Kilometer große Saturnmond Enceladus, der die Quelle des E-Rings zu sein scheint. Kräftige Einschläge von Ringteilchen selbst statt von interplanetarem Staub könnten seine Produktivität erklären. Jedes Teilchen, das Enceladus trifft, erzeugt gleich mehrere neue, sodass sich der Ring sozusagen selbst erhält. Anderswo führen solche Kollisionen in der Bilanz eher zum Verschwinden von Material aus Ringen.

Quellen und Senken müssen also bedacht werden, womit sich zugleich die klassische Frage neu stellt, ob die Planetenringe alt und dauerhaft oder aber jung und vergänglich sind. Wäre ersteres der Fall, dann könnten sie durchaus so alt wie das Sonnensystem sein. So wie die Protosonne von einer abgeflachten Wolke aus Gas und Staub umgeben war, aus der später die Planeten kondensierten, so hatte auch jeder Planet seine eigene Wolke, aus der sich seine Monde bildeten. Nahe am Planeten, innerhalb der Roche-Grenze, verhinderten Gezeitenkräfte aber das Zusammenballen von Monden – und ein Ring blieb übrig.

Die Ringe, die wir heute sehen, könnten aber auch erst viel später entstanden sein. Ein Körper, der einem Planeten zu nahe kam, könnte von Gezeitenkräften zerrissen oder ein Trabant könnte von einem heranrasenden Kometen zertrümmert worden sein – und nur wenn so etwas außerhalb der Roche-Grenze passiert, können sich die Bruchstücke erneut zu einem größeren Körper zusammenlagern. Selbst dieser wäre dann ein zerbrechliches Gebilde, das später um so leichter wieder zu zertrümmern wäre.

Mehrere Indizienketten legen nahe, dass die meisten Ringe jung sind. Zum einen überdauern kleine Partikel nicht lange. Selbst wenn sie interplanetare Mikrometeoriten und magnetosphärisches Plasma überstehen, so werden sie doch im Laufe der Zeit durch den Druck einfallender Strahlung abgebremst und auf immer engere Umlaufbahnen gezwungen, bis sie schließlich auf den zentralen Planeten stürzen. Aus diesem Grunde müssten feine Ringe binnen weniger tausend Jahre verschwinden, sofern nicht ständig Material nachgeliefert würde. Zum Zweiten kreisen einige Ringmonde sehr nahe an Ringen, obwohl die Rückkopplung durch die von ihnen angeregten Spiralwellen sie rasch auf größeren Abstand bringen müsste.

Hat auch der Mars einen Ring?

Des Weiteren sollten Ringteilchen aus Eis durch Absonderungen von Kometen eindunkeln, sie sind aber generell hell. Ferner haben die Monde knapp außerhalb der Saturnringe bemerkenswert geringe Dichten, so als ob es Trümmerhaufen wären. Und schließlich sind einige Monde in Ringe eingebettet. Wenn Ringe einfach nur altes Material sind, das sich nicht zusammenballen konnte, wo kommen dann diese Monde her? Sie machen mehr Sinn, wenn es einfach die größten übrig gebliebenen Trümmer eines zerstörten größeren Körpers sind.

Die Ringe sind also nicht ganz die zeitlosen Gebilde, die sie zu sein scheinen. Luke Dones vom Southwest Research Institute in Boulder, Colorado, vermutet, dass das gesamte komplexe Ringsystem Saturns aus den Trümmern eines 300 bis 400 Kilometer großen Mondes stammt. Und Ringe entwickeln sich auch beständig weiter. Joshua E. Colwell und Larry W. Esposito von der Universität von Colorado vermuten einen kontinuierlichen Massenaustausch zwischen Ringen und Monden: Die Trabanten kehren laufend Ringteilchen auf und geben nach energiereichen Kollisionen neue ab. Solch ein Gleichgewicht könnte die Ausdehnung vieler Ringe bestimmen, und Unterschiede in Zusammensetzung, Vergangenheit und Größe der Planeten wären die natürliche Erklärung für die bemerkenswerte Vielfalt der Ringsysteme.

Allmählich formt sich ein Gesamtbild, und es erklärt zugleich, warum die meisten der inneren Planeten keine Ringe haben: Es fehlt ihnen einfach ein Gefolge kleiner Monde als Quelle für die Ringteilchen. Der Mond der Erde ist zu groß, und alle mikrometergroßen Partikel, die seinem Schwerefeld entkommen, werden durch die Gravitation der Sonne oder durch den Druck der solaren Strahlung rasch weggerissen. Der Mars mit seinen zwei kleinen Monden könnte Ringe aufweisen. Zwei von uns (Hamilton und Showalter) haben vergangenes Jahr mit dem Hubble-Weltraumteleskop danach gesucht, allerdings vergeblich. Wenn es einen Marsring gibt, dann muss er extrem ausgedünnt sein, mit einer optischen Tiefe von weniger als 10^{-8}.

Wie so oft in der Wissenschaft bestimmen dieselben grundlegenden Prinzipien Phänomene, die anscheinend gar nichts miteinander zu tun haben. Das Sonnensystem und andere Planetensysteme kann man sich als große Ringe um Sterne vorstellen. Schon haben Astronomen die ersten Hinweise auf Lücken und Resonanzen in Staubscheiben um andere Sterne gefunden, ebenso wie Anzeichen von Körpern in den Scheiben, die als Staubquellen dienen. Die engen elliptischen Bahnen vieler großer Planeten anderer Sterne lassen sich am besten verstehen, wenn sie Drehimpuls mit massereichen Scheiben austauschen (siehe „Schwerkraft-Billard im Sonnensystem“, Spektrum der Wissenschaft 11/1999, S. 32).

Planetenringe sind nicht nur schöne und spektakuläre Gebilde: Sie könnten geradezu der Schlüssel für die Erkenntnis sein, wie Planeten entstehen. ■

Joseph A. Burns *ist Professor für Ingenieurwesen und Astronomie an der Cornell-Universität in Ithaca (New York), wo auch* ***Douglas P. Hamilton*** *und* ***Mark R. Showalter*** *studierten. Hamilton ist nun Professor an der Universität von Maryland, während Showalter an der Stanford-Universität forscht, wo er über das Nasa-Datenarchiv für Planetenringe wacht. Alle drei Autoren sind maßgeblich an Raumsonden-Missionen zu den äußeren Planeten beteiligt.*

Literaturhinweise

Mission Jupiter. Von Daniel Fischer. Birkhäuser 1998.

Planetary Rings. Von Joseph A. Burns in: The New Solar System. J. Kelly Beatty et al. (Hg.), Cambridge University Press, 1999.

The Formation of Jupiter's Faint Rings. Von Joseph A. Burns et al. in: Science, Bd. 284, S. 1146, 1999.

Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“.*

PALÄONTOLOGIE

Erbrochenes Saurier-Mahl

In einer Lehmgrube im ostenglischen Peterborough haben Forscher den erbrochenen Mageninhalt eines Dinosauriers entdeckt. Er besteht aus Rostren von Belemniten – Innenskeletten von Verwandten der Tintenfische, die vor mehr als 150 Millionen Jahren die See um Großbritannien bevölkerten. Die Tiere waren leichte Beute für Ichthyosaurier, die damals über die Meere herrschten. Peter Doyle von der Universität Greenwich (England) und Jason Wood von der Open University präsentierten ihren Fund auf einer paläontologischen Konferenz in Kopenhagen. Als entscheidenden Beleg dafür, dass es sich um Erbrochenes handelt, werten sie unter dem Elektronenmikroskop sichtbare Ätzspuren. Für diese Annahme spricht auch, dass die Reste vorwiegend von jungen Tieren stammen, die wohl kaum eines natürlichen Todes gestorben sind. Der urzeitliche Räuber dürfte die unverdaulichen Skelette ausgewürgt haben, wie das heute noch Pottwale tun. Dass sie auf dem üblichen Weg ausgeschieden wurden, lässt sich ausschließen, denn die spitzen, harten Kalkstrukturen hätten die Därme beschädigt.



PETER DOYLE, UNIVERSITÄT GREENWICH

Die angeätzte Oberfläche im Vergleich zur unberührten Kristallstruktur beweist: Die fossilen Belemniten wurden erbrochen.

ASTRONOMIE

Falsch gewickelte Galaxie

Während Spiralgalaxien im All rotieren, ziehen sie gewöhnlich ihre Arme hinter sich her. Doch nun haben Ron Buta von der Universität von Alabama in Tuscaloosa und Kollegen erstmals ein Sternsystem entdeckt, das sich andersherum dreht. Über diese Kuriosität berichteten sie kürzlich vor der Amerikanischen Astronomischen Gesellschaft. Die NGC 4622 benannte Galaxie liegt 111 Millionen Lichtjahre entfernt im Sternbild Zentaur. Welche Teile davon sich von der Erde entfernen und welche sich ihr nähern, ließ sich schon vor Jahren mit Hilfe des Dopplereffekts feststellen. Erst mit dem Hubble-Weltraumteleskop konnten die Astronomen jedoch auch erkennen, welche Seite näher zur Erde hin liegt, und so auf den Drehsinn der Galaxie schließen. Wegen der leichten Neigung von NGC 4622 gegen die Blickrichtung ist nämlich auch die galaktische Staubscheibe in der inneren Region verkippt, sodass man auf der nahen Seite die zentrale Ausbeulung durch den Staub, bei der entfernteren dagegen den Staub durch die Ausbeulung sieht. Dies verursacht extrem schwache Helligkeitsunterschiede, die erst auf dem Hubble-Bild nachweisbar waren. Der umgekehrte Drehsinn von NGC 4622 rührt vermutlich von der Wechselwirkung mit einer kleineren Galaxie her, die mit der größeren sogar verschmolzen sein könnte.



NASA / THE HUBBLE HERITAGE TEAM

Die Spiralarme von NGC 4622 zeigen in Rotationsrichtung.

KLIMATOLOGIE

Christkind erst seit 5000 Jahren

El Niño ist eine großräumige Klimaschwankung im Bereich des Südpazifiks, die alle paar Jahre auftritt. Nach neuesten Ergebnissen eines Teams um Fred Andrus von der Universität von Georgia in Athens aber gibt es sie erst seit rund 5000 Jahren. Die Forscher untersuchten Gehörsteinchen aus dem Labyrinthorgan des peruanischen Kreuzwelses, die sie in archäologischen Ausgrabungsstätten in Peru gefunden hatten. Diese „Otolithen“ zeigen Wachstumszonen ähnlich den Baumringen. Je nach den herrschenden Temperaturen schwankt das Verhältnis des schwereren Sauerstoff-18- zum leichteren Sauerstoff-16-Isotop. Damit lassen sich die Wetterbedingungen zu Lebzeiten des Fisches erschließen. Das Ergebnis der Untersuchung: Die wiederkehrende Erwärmung des tropischen Pazifiks im Rahmen von El Niño spiegelt sich erst in Otolithen aus den letzten 5000 Jahren wider. Dies zeigt, wie variabel das natürliche Klima innerhalb erdgeschichtlich kurzer Zeiträume sein kann. (*Science, Bd. 295, S. 1508*)



F. ANDRUS / UNIVERSITY OF GEORGIA

Klimazeuge: Gehörsteinchen eines Kreuzwelses mit Wachstumsstreifen

PSYCHOLOGIE

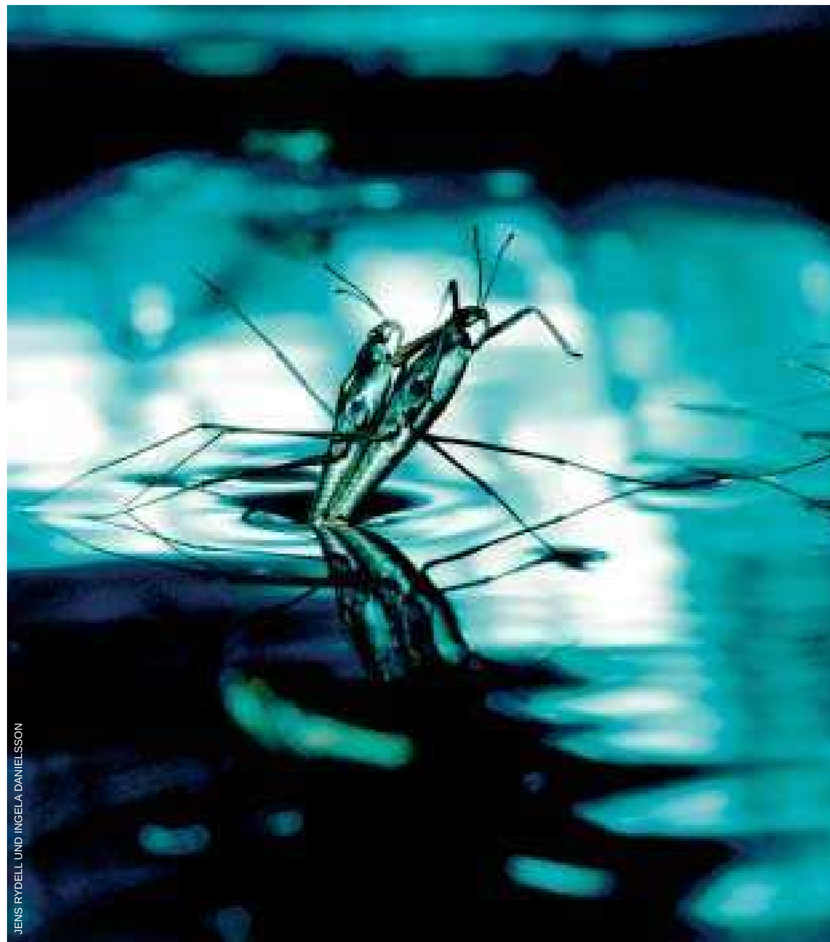
Kleine Besserwisser

Kinder verfügen schon sehr früh über ein eigenes Urteilsvermögen. Bereits mit etwas über einem Jahr ahmen sie nicht bloß nach, was ihnen die Erwachsenen vormachen, sondern entscheiden selbst über das beste Mittel zum Zweck. Das zeigen Untersuchungen eines Teams um den ungarischen Psychologen György Gergely an einer Gruppe 14 Monate alter Kleinkinder. Vor deren Augen betätigte eine erwachsene Person mit der Stirn einen Lichtschalter, der vor ihr auf dem Tisch lag. In einem Fall legte sie dabei die Hände sichtbar auf den Tisch, im anderen verhüllte sie Oberkörper und Hände mit einem Tuch. Blieben die Hände sichtbar frei, ahmten 69 Prozent der Kleinkinder die Stirntechnik nach – offenbar weil sie einen besonderen Trick dahinter vermuteten. Waren die Hände dagegen nicht zu sehen, taten es nur noch 21 Prozent der Kleinen dem großen Vorbild gleich. Die anderen gingen wohl davon aus, dass der Erwachsene bloß deshalb die Stirn benutzte, weil er seine Hände gerade für etwas anderes brauchte. Da sie selbst aber ihre Händchen frei hatten, setzten sie diese auch ein. Gergely folgert daraus, dass kleine Kinder bereits mit 14 Monaten die Handlungen der Großen hinterfragen und danach bewerten, wie sinnvoll sie ihnen erscheinen. *(Nature, Bd. 415, S. 755)*

BIOLOGIE

Wettrüsten im Geschlechterkampf

Männchen wollen nur das eine: ihre Erbanlagen so weit wie möglich streuen. Doch Weibchen sind wählerisch und bestrebt, den besten Vater für ihren Nachwuchs zu finden. Dass dieser Interessenkonflikt zwischen den Geschlechtern durchaus in einer Art Wettrüsten gipfeln kann, zeigen einmal mehr Untersuchungen an 15 Wasserläufer-Arten, die Göran Arnquist von der Universität Uppsala (Schweden) und Locke Rowe von der Universität Toronto (Kanada) durchgeführt haben. Dabei verglichen sie die besonderen Körperstrukturen der einzelnen Arten mit der Paarungsrate. So verfügen die Männchen bei bestimmten Spezies über spezielle „Greifarme“, mit denen sie versuchen, unwillige Weibchen in den Schwitzkasten zu nehmen und sie so doch noch zu erobern. Die Weibchen halten mit Dornen am Hinterleib dagegen. Arnquist und Rowe stellten fest, dass sich je nach „Waffenarsenal“ das eine oder das andere Geschlecht durchsetzt. Das unterlegene scheint daraufhin jedoch jeweils die eigene Bewaffnung zu verbessern und so das „Wettrüsten“ am Laufen zu halten. Diese Form des Geschlechterkampfes könnte letztlich auch zur Entstehung neuer Arten führen. *(Nature, Bd. 415, S. 787)*

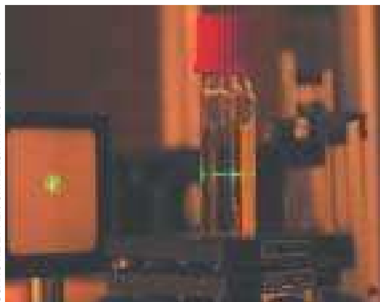

JENS RYDELL UND INGELA DANIELSSON

Beim Paarungsakt messen Weibchen und Männchen des Wasserläufers ihre Kräfte.

PHYSIK

Drei auf einen Streich

Erstmals konnten Physiker nun Laserlicht durch so genannte Drei-Photonen-Anregung erzeugen und damit die Frequenz eines Lasers verdreifachen. Die Gruppe um Guang He an der Staatsuniversität von New York in Buffalo entwickelte dazu einen organischen Farbstoff mit speziellen nichtlinearen optischen Eigenschaften. Wird er mit intensivem infrarotem Laserlicht bestrahlt, absorbieren die Moleküle drei der langwelligen Photonen auf einmal statt wie in gängigen Lasermedien nur ein einzelnes. Dadurch wird jeweils ein Elektron auf ein entsprechend höheres Energieniveau angehoben. Fallen die angeregten Elektronen auf ihr ursprüngliches Niveau zurück, setzen sie in einer „Lawine“ Photonen mit der dreifachen Energie der anregenden Lichtteilchen frei: das infrarote Laserlicht wandelt sich so in gelblich-grünes um. „Kürzere Wellenlängen sind wünschenswert für die Datenübertragung, denn damit lassen sich Speicherdichte und Auflösung der Daten erhöhen“, betont He. Die Mehr-Photonen-Anregung wurde erstmals 1931 von der deutschen Physikerin Maria Goeppert-Mayer vorhergesagt, aber erst sechzig Jahre später gelang es, die simultane Absorption von zwei Photonen experimentell nachzuweisen. *(Nature, Bd. 415, S. 767)*

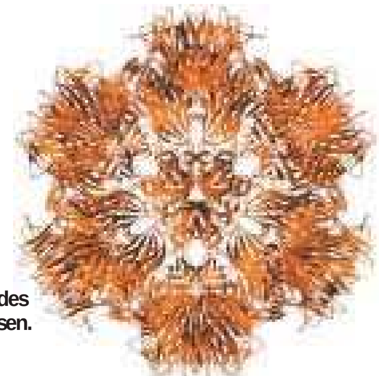

GUANG HE ET AL. / UNIVERSITY AT BUFFALO

Aus Infrarot wird Grün – dank Drei-Photonen-Anregung.

MEDIZIN

Rheuma nur mit Lasche

Zu den mehr als hundert rheumatischen Leiden zählen auch Autoimmunkrankheiten wie der *Lupus erythematodes* und die rheumatoide Arthritis. Der Lupus führt zu Abwehrreaktionen gegen Haut, Blutgefäße, Nieren und Gelenke, während die Arthritis Gelenksteifigkeit und sogar Gelenkverformung hervorrufen kann. Als Hauptschuldiger steht seit langem das Protein Tall-1 im Verdacht. Es soll die B-Zellen des Immunsystems so stark stimulieren, dass sie übermäßig viel Antikörper bilden und ausschütten. So entwickeln genetisch veränderte Mäuse, die zu viel Tall-1 produzieren, Lupus-ähnliche Krankheitssymptome. Forscher vom National Jewish Medical and Research Center in Denver haben nun herausgefunden, dass eine Art Lasche am Tall-1-Molekül für die krankhafte Wirkung verantwortlich ist. Erst sie bewirkt, dass sich bis zu sechzig Tall-1-Proteine zu einem großen Molekülball vereinigen, der das Immunsystem durcheinander bringt. Ohne Lasche kommt es nicht zur Aggregatbildung und auch nicht zur übermäßigen Anregung der B-Zellen. Diese Molekülregion könnte daher ein gutes Ziel für die Entwicklung von Medikamenten gegen Lupus und Arthritis abgeben. *(Cell, Bd. 108, S. 383)*


NATIONAL JEWISH MEDICAL AND RESEARCH CENTER

Dieses Aggregat aus 60 Molekülen des Proteins Tall-1 kann Rheuma auslösen.

SEHSTÖRUNGEN

Wenn die Netzhaut verfällt

Wenn im Alter die Welt vor Augen verschwimmt, liegt das oft an einem winzigen Defekt mitten in der Netzhaut des Auges: an einer Degeneration der so genannten Makula. Erkenntnisse über die molekularen Ursachen dieser Augenerkrankung wachsen nun rapide – und damit die Hoffnung auf neue therapeutische Ansätze.

Von Hui Sun und Jeremy Nathans

Beobachten Sie einmal genau sich selbst beim Lesen: Der Blick springt zum nächsten Zeilenanfang und schwenkt dann von links nach rechts. Wie wichtig diese rasche Bewegung der Augen ist, können Sie leicht feststellen, indem Sie auf eine Stelle in dem Satz hier starren. Ein bis zwei Zentimeter weit nach rechts oder links vermögen Sie die Buchstaben deutlich zu erkennen; das Übrige erscheint als schwarz-weißes Muster.

IN KÜRZE

➤ Wer ein Objekt scharf und deutlich sehen will, muss die Augen so drehen, dass es auf der **Sehgrube im gelben Fleck der Netzhaut** abgebildet wird. Eine Degeneration des gelben Flecks – der **Makula** – kann dieses Areal so schädigen, dass die zentrale Sehschärfe praktisch völlig verloren geht.

➤ Den Erkrankungstyp bei Älteren nennt man **senile oder altersabhängige Makula-Degeneration**, gelegentlich auch Netzhautverkalkung. Sie betrifft etwa ein Viertel der Menschen über 75. Dabei sterben spezialisierte Zellen ab, welche die Sehzellen bei der Regeneration ihrer Sensoren unterstützen.

➤ Offenbar bestehen gewisse Veranlagungen für diese Alterskrankheit. Ein erster Kandidat dafür ist nun ein verändertes Gen für ein Transportprotein, das beim **Recycling des Sehfarbstoffs** mitwirkt.

Gewöhnlich fällt uns überhaupt nicht auf, dass wir kaum ein Prozent des Gesichtsfeldes in hoher Auflösung wahrnehmen. Unser tastender Blick richtet sich unwillkürlich auf das, was gerade interessiert – und eben dieser anvisierte Ausschnitt wird dann, ohne dass wir den Kopf drehen müssen, mitten auf der Netzhaut am Augenhintergrund abgebildet. Dort, direkt gegenüber der Pupille, liegt ein besonderer Bereich dieser papierdünnen Schicht mit ihren lichtempfindlichen Sinneszellen: der gelbe Fleck. Anatomisch heißt das nicht einmal reiskorngroße Areal *Macula lutea* oder eingedeutscht kurz Makula. Eingesenkt in deren Mitte liegt die Sehgrube, die Stelle, mit der wir am schärfsten sehen und am besten Farben unterscheiden.

In der starken Fokussierung dieser Fähigkeiten steckt freilich eine große Gefahr: Wird der winzige gelbe Fleck geschädigt, verschlechtert sich die Sehschärfe im gesamten zentralen Gesichtsfeld beträchtlich. Eben das ist bei der so genannten Makula-Degeneration der Fall, einem meist im höheren Alter auftretenden Augenleiden. Allein in Deutschland sind schätzungsweise ein bis zwei Millionen Menschen betroffen, und etwa jeder Vierte über siebzig Jahren hat damit zu tun. Zwar erblindet man selbst im späten Stadium der Krankheit gewöhnlich nicht völlig. Doch immer dort, wo man gerade hinblickt, erscheint ein grauer zentraler Schatten, der es schließlich unmöglich macht, etwa zu lesen, fernzusehen oder Gesichter zu erkennen (Abbildungen Seite 49 und 50). Kaum sonst wo im menschlichen Organismus hat der Ausfall eines so winzigen Gewebestücks derart dramatische Folgen.

Seit langem können Augenärzte die verschiedenen Formen der Krankheit akkurat diagnostizieren. Die Erforschung ihrer Ursachen, vor allem auf molekularer Ebene, hat aber erst in neuerer Zeit deutliche Fortschritte gemacht. Von weiteren Erfolgen erhofft man sich neue medizinische Verfahren, um den schleichenden Verfall des gelben Flecks wirksam zu verlangsamen oder sogar zu stoppen. Oberstes Fernziel aber bleibt, auch schon bestehende Schäden zu beheben.

Was im gelben Fleck degeneriert, sind die Sehzellen der kompliziert gebauten Netzhaut und die Schutzzellen darunter (siehe Abbildung auf Seite 51). Jeder Photorezeptor trägt einen langen, ▶

Etwa so gewahren Patienten, die an Makula-Degeneration leiden, den Buchstaben L in der dritten Zeile. Bei ihnen ist die Stelle schärfsten Sehens auf der Netzhaut geschädigt. Das E ganz oben und die unteren Zeilen erscheinen hingegen verschwommen, weil die Augen sowohl von Erkrankten als auch von Gesunden die Randbereiche des Gesichtsfeldes stets nur mit geringer Auflösung erfassen.

E

C B

D L F

P T E O

VERÄNDERT VON SARA CHEN



BEIDE BILDER VERÄNDERT DURCH SARA CHEN

Wie wichtig der gelbe Fleck ist, veranschaulichen diese verfremdeten Fotos. Gesunden Personen erscheinen die Objekte in der Mitte des Gesichtsfeldes viel schärfer als die am Rand.



Nur der zentrale Bereich der Netzhaut ermöglicht ein hoch auflösendes Sehen. Bei der Makula-Degeneration ist gerade dieser Bereich geschädigt und lässt Objekte wie auf diesem Bild erscheinen.

als Außensegment bezeichneten Fortsatz. Nach dessen Form sind die beiden Haupttypen von Sehzellen benannt: Bei den „Zapfen“ verjüngt der Fortsatz sich zu einer Spitze, bei den „Stäbchen“ bleibt er auf ganzer Länge zylindrisch.

Die Stäbchen, zuständig vor allem für das Dämmerungssehen, liegen überwiegend im Randbereich der Netzhaut. Da sie lediglich Hell-Dunkel-Unterschiede registrieren, erscheinen alle von ihnen erfassten Gegenstände „farblos“. Zur Mitte der Netzhaut hin konzentrieren sich die farbtüchtigen Zapfen. Am dichtesten liegen sie in der Sehgrube, der Stelle allerschärfsten Sehens. Dort gibt es überhaupt keine Stäbchen mehr.

Im Außensegment der Photorezeptoren stapeln sich flache Membransäckchen wie Teller übereinander, allerdings zu Hunderten. Der Zellkörper produziert unablässig solche Membranen, bestückt mit Licht absorbierenden Molekülen, und fügt sie unten dem Stapel an. Tag für Tag werden so etwa zehn Prozent der „Teller“ nachgeliefert. Unterdessen baut eine angrenzende Zellschicht, das Retina-Pigmentepithel (RPE), entsprechend viel von der Spitze ab. Dieser Prozess verhindert wahrscheinlich, dass sich im ältesten Teil des Außensegments Eiweiß- und Fettbausteine ansammeln, die durch Licht und Sauerstoff – also durch Photooxidation – geschädigt wurden.

Das Pigmentepithel der Netzhaut macht sich aber auf noch andere Weise nützlich: Es

- sorgt dafür, dass die Flüssigkeit um die Sehzellen immer die richtige Ionen-Zusammensetzung behält,
- bereitet den Vitamin-A-Abkömmling wieder auf, den die Sehzellen zur Lichtdetektion brauchen,
- transportiert und filtert Nährstoffe aus der stark durchbluteten Aderhaut, die hinter ihm liegt.

Mehr noch: Dank seiner starken Pigmentierung aus dunklen Melanin-Körnchen schluckt es alle Photonen, die Zapfen und Stäbchen durchdringen, und mindert so den Verlust an Bildqualität, den Streulicht im Auge verursachen würde.

Für Patienten macht sich eine Degeneration des gelben Flecks zwar ziemlich einheitlich bemerkbar: als Schärfeverlust des zentralen Gesichtsfeldes. Ihre Netzhaut sieht dabei jedoch von Fall zu Fall sehr verschieden aus. Die senile oder altersabhängige Makula-Degeneration geht häufig mit einem Verlust von Pigmentzellen einher. Wenn der Arzt den Augenhintergrund mit einem Ophtalmoskop, einem „Augenspiegel“, betrachtet, so sieht er entfärbte oder nur noch unregelmäßig pigmentierte Bereiche.

Genauer lässt sich diese Zellzerstörung mit der Fluoreszenz-Angiografie untersuchen. Dazu injiziert der Arzt einen speziellen, gelbgrün fluoreszierenden Farbstoff in eine Armvene. In gesunden Augen zeichnen sich daraufhin die feinen Gefäße der Netzhaut selbst gut ab. Die viel größeren der Aderhaut hingegen verschwinden, obwohl sie leuchten, hinter dem Licht schluckenden Schirm des Pigmentepithels weit gehend. Bei der senilen Makula-Degeneration schimmern sie aber überall dort deutlich dort durch, wo Pigmentzellen fehlen.

Das Verfahren kann außerdem ein gravierendes Problem sichtbar machen: Bei rund zehn Prozent der Patienten wuchern aus der Aderhaut Blutgefäße in die Netzhaut ein oder machen sich direkt unter ihr breit. Dort liegt eigentlich die dünne Bruch’sche Membran; sie besteht aus Proteinen und Zuckerketten. Die nach dem Anatomen Karl Wilhelm Bruch (1819–1884) benannte Membran soll die Aderhaut am Pigmentepithel fixieren. Zugleich wirkt sie als Grenzschicht. Dennoch durchgedrungene neue Gefäße neigen zu Blutungen. Die Netzhaut trägt dann bleibende Narben davon.

Verheerende Schlackstoffe

Bei defekter Bruch’scher Membran sammelt sich außerdem leicht Flüssigkeit unter oder über dem Pigmentepithel. Mediziner sprechen von feuchter Makula-Degeneration. Die Flüssigkeitsansammlung ist hinderlich, weil die eigentliche Schicht der Sehzellen normalerweise keine die Ordnung störenden Blutgefäße enthält; Sauerstoff und Nährstoffe müssen aus der Aderhaut bis in diesen Teil der Netzhaut wandern können.

Im Pigmentepithel von Erwachsenen schließen sich Lücken offenbar nur unvollständig wieder, vermutlich weil seine Zellen sich kaum mehr teilen oder ausdifferenzieren können. Warum aber funktionieren ausgereifte Zellen dieser Schicht im höheren Alter schlechter oder sterben sogar ab?

Besonders gefährdet dürfte das Pigmentepithel durch seine Mammutaufgabe sein, unablässig die Spitzen der Außensegmente von Zapfen und Stäb- ▶

Ein tiefer Blick ins Auge

Der gelbe Fleck liegt mitten auf der papierdünnen Netzhaut, die den hinteren Augapfel auskleidet. Trotz des geringen Durchmessers von rund zwei Millimetern umfasst das Areal mehrere hunderttausend Sehzellen – Stäbchen und vor allem Zapfen –, die das Licht absorbieren und entsprechende Sinnesinformationen über zwischengeschaltete Nervenzellen dem Gehirn zuleiten.

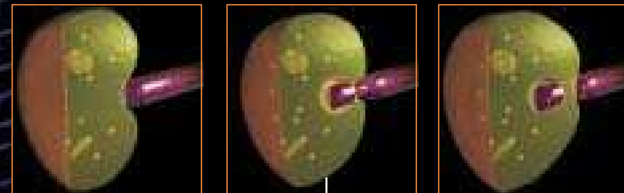
Linse

Makula (gelber Fleck)

Pupille

Die gesunde Struktur

Das Licht fällt durch Schichten aus nahezu durchsichtigen Ganglien- und Bipolarzellen auf die Stäbchen und Zapfen (links). Erst deren Außensegmente sind die Lichtsensoren. Sie müssen ständig erneuert werden. Während pro Tag etwa zehn Prozent von ihrer Basis her nachwachsen, baut das angrenzende Retina-Pigmentepithel (RPE) entsprechend viel von ihrer Spitze ab (Bildserie). Das Material wird recycelt.



Ausläufer einer RPE-Zelle

Ganglienzellen

Bipolarzellen

Sehzellen (Stäbchen und Zapfen)

Licht

Außensegment einer Sehzelle

Blutgefäß der Aderhaut

RPE-Zelle

Bruch'sche Membran

Die geschädigte Struktur

Bei der Makula-Degeneration werden die Außensegmente möglicherweise nicht ordnungsgemäß abgebaut und wiederverwertet. In immer mehr RPE-Zellen lagert sich „unverdauliches" Material ab, an dem sie langsam zu Grunde gehen. Dann sterben auch die benachbarten Sehzellen ab. In manchen Fällen wachsen zudem anomale Gefäße von der Aderhaut her durch die so genannte Bruch'sche Membran ein. Sie neigen zu Blutungen, und die Netzhaut kann vernarben.

neues Blutgefäß

BRYAN CHRISTIE

chen abzubauen und das Material zu recyceln. Die Epithelzellen sind flach und dabei so groß, dass jede rund fünfzig Photorezeptoren zu betreuen hat. Von ihnen muss sie täglich, lebenslang, zehn Prozent des „Tellerstapels“ aufnehmen und abbauen. Das entspricht einer Masse von fünf roten Blutkörperchen. So viel verleibt sich keine andere „fressende“ Zelle des Körpers ein. Und das kann auch Verdauungsprobleme geben.

Seltene erbliche Krankheiten

Mit den Jahren sammelt sich ohnehin in vielen Körperzellen, so auch in den Müllschluckern des Pigmentepithels, immer mehr „Altersabfall“ an: ein körniges gelbliches Materialgemisch namens Lipofuscin. Direkt unter dem Epithel, außerhalb der Zellen, können sich so genannte Drusen bilden. Woraus diese Ablagerungen bestehen, ist nicht vollständig geklärt; wahrscheinlich entstehen auch sie zumindest teilweise aus „unverdaulichen“ Resten von Außensegmenten. Die Drusen werden so groß, dass der Arzt sie im Ophthalmoskop erkennen kann. Sie sind ein Warnzeichen: Parallel zu ihrer Menge steigt die Gefahr, durch eine senile Makula-Degeneration Sehkraft einzubüßen.

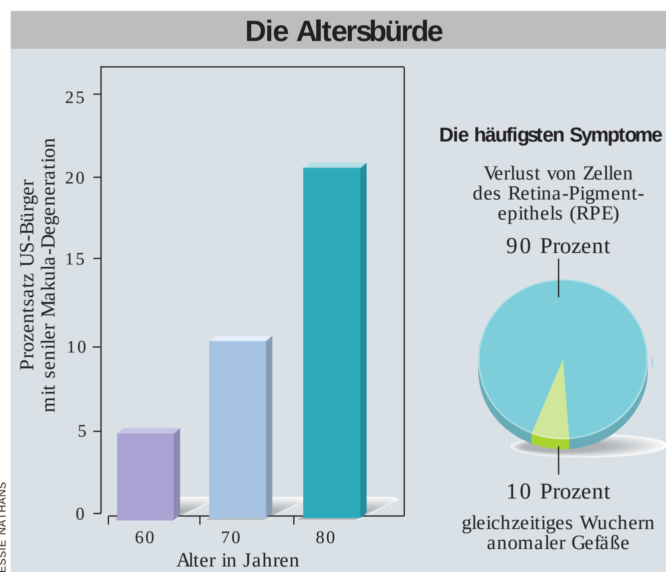
Aus epidemiologischen Studien haben sich übereinstimmend drei Risikofaktoren für die Entwicklung einer senilen Makula-Degeneration herausgeschält: zunehmendes Alter, Rauchen und frühere Fälle dieses Leidens in der Familie. In den Vereinigten Staaten sind grob fünf Prozent der Sechzigjährigen, zehn Prozent der Siebzigjährigen und zwanzig Prozent der Achtzigjährigen betroffen. Die meisten von ihnen leiden zwar erst an einem Frühstadium, das ihre Sehkraft relativ wenig beeinträchtigt; aber die Wahrscheinlichkeit, dass die Krankheit sich verschlimmert, ist nicht unbeträchtlich.

Wenn ein solches Altersleiden gehäuft innerhalb einer Familie auftritt, könnte dies zwar auch auf gemeinsame Umwelt- und Lebensbedingungen ihrer Mitglieder zurückzuführen sein. Doch stützen überzeugende Befunde den Verdacht auf eine genetische Komponente: Erkrankt einer von eineiigen Zwillingen, bleibt auch der andere fast nie verschont. Die so genannte Konkordanz beträgt hier also fast hundert Prozent. Bei zweieiigen Zwillingen und gewöhnlichen Geschwistern liegt sie dagegen unter fünfzig Prozent. Eine Konkordanz verrät freilich nicht, mit wie vielen Genen man es zu tun hat und welche der schätzungsweise 30 000 Gene des Menschen die Anfälligkeit bewirken. In dieser Hinsicht stellt die senile Makula-Degeneration die Forscher vor eine besondere Herausforderung. Denn üblicherweise untersuchen sie zum Nachweis einer erblichen Disposition zunächst Sippen mit zahlreichen Betroffenen. Eine Krankheit aber, die erst im hohen Alter auftritt, findet sich häufig nur bei wenigen Mitgliedern einer Familie, weil viele dafür noch zu jung und andere bereits vor dem Auftreten der ersten Symptome gestorben sind.

Deswegen haben sich die Genetiker auf seltene Formen der Makula-Degeneration konzentriert, die meist bereits jüngeren Leuten zu schaffen machen und eindeutige Vererbungsmuster erkennen lassen. Besonders eingehend untersucht sind bislang die

- Doyn’sche Honigwaben-Dystrophie,
- Best’sche Makula-Dystrophie,
- Sorsby’sche Fundus-Dystrophie,
- Stargardt’sche Makula-Dystrophie.

Die Namen beziehen sich auf den jeweiligen Erstbeschreiber, im letzten Beispiel auf den deutschen Augenarzt Karl Stargardt (1875–1927). Diese Krankheit ist mit etwa einem Fall unter 10 000 Personen die häufigste unter diesen vier erblichen Formen.



Allein in Deutschland leiden rund eine Million Menschen an einer Makula-Degeneration, in den USA nahezu zwei Millionen. Rund ein Fünftel aller Achtzigjährigen sind in den Vereinigten Staaten von der Altersform der Krankheit betroffen. Bei etwa zehn Prozent dieser Patienten gehen nicht nur RPE-Zellen zu Grunde – es wuchern auch anomale Blutgefäße aus, die die Sehkraft schwer beeinträchtigen.

Typisch für alle vier ist, dass der zentrale Bereich der Netzhaut geschädigt wird und dass sich im Pigmentepithel oder darunter störendes Material ansammelt. Sicherlich müssen diese Erkrankungen, die in jungen oder mittleren Jahren ausbrechen, ohnehin intensiv erforscht werden, aber ihre äußerliche Ähnlichkeit mit der senilen Makula-Degeneration macht Hoffnung, entscheidende Hinweise auch auf die Ursachen des Altersleidens zu erlangen.

Gestörte Müllentsorgung durch Gendefekte

Tatsächlich sind die Forscher bei den erblichen Formen genetisch fündig geworden. Durch Vergleich der Vererbungsmuster ließ sich zunächst bestimmen, auf welchen Chromosomen jeweils weiter zu suchen war; dann identifizierte man die fraglichen Gene selbst anhand der Unterschiede zwischen den DNA-Sequenzen von Kranken und Gesunden. Bei drei der Sehstörungen stellte sich heraus, dass eine ganze Reihe von Mutationen in dem jeweils relevanten Gen eine Erkrankung hervorrufen können. Eine Ausnahme bildet die Honigwaben-Dystrophie: Offensichtlich tragen sämtliche Betroffenen die exakt gleiche Mutation; sie alle müssen, obgleich weit über Europa und die Vereinigten Staaten verteilt, einen gemeinsamen Vorfahren haben, bei dem der Defekt erstmals aufgetreten war.

Als Nächstes nahmen die Wissenschaftler die Proteine unter die Lupe, die von den mutierten Genen stammen – immer auch mit dem Hintergedanken, einen Ansatzpunkt für künftige Medikamente zu finden.

Bisher am besten durchschaubar ist die Stargardt-Krankheit, bei der sich schon in jüngeren Jahren Unmengen an Altersmüll im Pigmentepithel anhäuft; das eigentliche Problem liegt aber, wie wir seit kurzem wissen, in den Außensegmenten der Sehzellen – bei einem Transportprotein mit dem Kürzel ABCR. Es sitzt in den Membranen der gestapelten Teller und dürfte eine dort „verbrauchte“ und nun zu recycelnde Hauptkomponente des Sehfarbstoffs ausschleusen. Dafür sprechen jedenfalls Reagenzglas-Versuche mit dem intakten Transporter.

Von der wichtigen Licht absorbierenden Komponen-

te, einem Abkömmling von Vitamin A, weiß man, dass sie allmählich mit den Fettmolekülen in der Teller-Membran reagiert – umso mehr natürlich bei einem Transportstau an eben dieser Stelle. Das leider schwer abbaubare Produkt landet zwangsläufig mit den alten Tellern in den Zellen des Pigmentepithels und sammelt sich in ihnen als Bestandteil des Altersmülls an. Das tut es zwar auch in gesunden Augen mit der Zeit, aber in geringerer Menge. Neuere Erkenntnisse deuten darauf hin, dass es die Pigmentzellen anfälliger für lichtbedingte Schäden macht und so ihre Lebensdauer verkürzt.

Bei der Stargardt-Krankheit kann das Gen für das Transportprotein an verschiedenen kritischen Stellen defekt sein. Interessanterweise kommen zwei andere Veränderungen des Gens bei Personen mit seniler Makula-Degeneration häufiger vor als in der Gesamtbevölkerung; derartige Spielarten könnten also zu einer gewissen Anfälligkeit auch für die Altersform der Erkrankung beitragen.

Die übrigen bekannten Gene, die bei den drei anderen früh einsetzenden Erkrankungen mutiert sind, zeigen sich zwar bei der senilen Degeneration unverändert intakt. Doch die aus den Defekten erwachsenden Folgen dürften in funktionell ähnlicher Form auch bei der Altersform eine Rolle spielen, nur dass sie dort andere Ursachen hätten. Mehreren Befunden zufolge beeinträchtigen die Mutationen, die Sorsby'sche Fundus-Dystrophie verursachen, möglicherweise auch die Fähigkeit des Auges, Material außerhalb der Zellen abzubauen. Bei den Patienten ist deshalb die – außerzelluläre – Bruch'sche Membran auf der Aderhaut stark verdickt. Wichtige Nährstoffe können dann nur schlecht zum Pigmentepithel und weiter in die Netzhaut wandern. Auch bei den beiden anderen erblichen Formen unserer Liste sind nach ersten Indizien Funktionen der Bruch-Membran und des Pigmentepithels gestört. Wie es aussieht, müssen also Medikamente gefunden werden, die insbesondere die Abbaufunktionen der Zellen unterstützen.

Einen anderen Ansatz für die Forschung bieten reaktionsfreudige freie Radikale. Das sind sauerstoffhaltige Verbindungen mit ungepaarten Elektronen, die wohl in allen Organismen – ob Bakterie, Pflanze, Tier oder Mensch – erhebliche Schäden anrichten können. Wie Untersuchungen an Labortieren erwiesen haben, schädigen freie Radikale sowohl die Sehzellen als auch das Pigmentepithel. Die aggressiven Stoffe entstehen durch den Sehprozess selbst. Eigentlich ist es eine Ironie der Natur, dass ausgerechnet die Eigenschaften von Vitamin A und seinen

Wuchernde lecke Blutgefäße verraten sich eindrucksvoll bei einer Fluoreszenz-Angiografie. Dazu wird ein Fluoreszenz-Farbstoff ins Blut injiziert.



BEIDE BILDER: KEVIN LANGTON, DEPT. OF OPHTHALMOLOGY, COLUMBIA UNIVERSITY

Zwölf Sekunden später (rechts): Der Farbstoff hellt die Netzhautarterien auf, die Venen aber bleiben noch dunkel. Die degenerierte Makula erscheint als dunkler Fleck infolge von Blutungen aus anomalen Gefäßen, die von der Aderhaut eingewachsen sind.



Eine halbe Minute später: Die Makula leuchtet auf, weil inzwischen farbstoffhaltiges Blut eingesickert ist.

Abkömmlingen, die diese Moleküle so gut Licht absorbieren lassen, sie zu Produzenten freier Radikale machen.

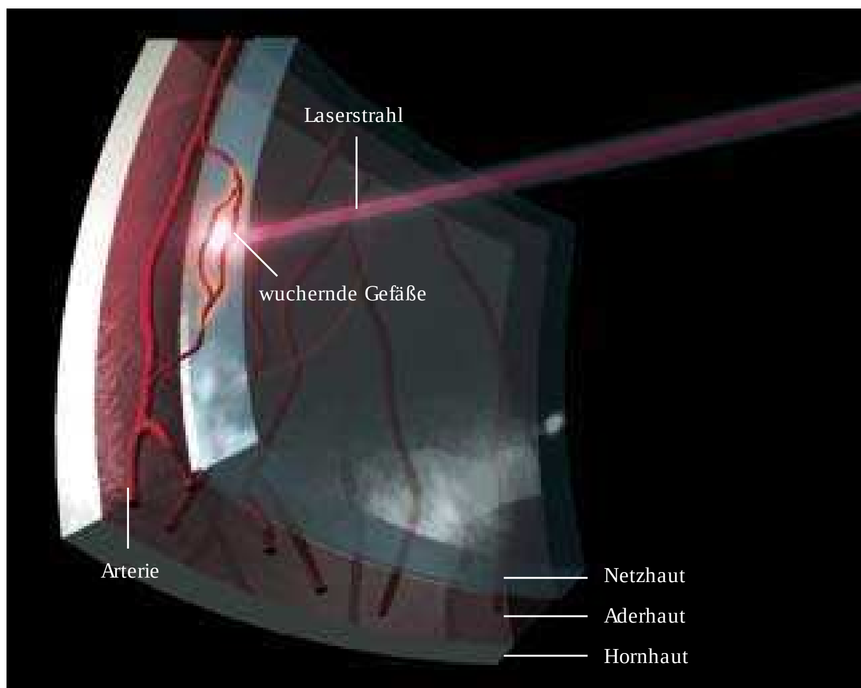
Freie Radikale im Verdacht

Mehreren epidemiologischen Studien zufolge scheinen Menschen, die sich ausgiebig grellem Licht aussetzen, tatsächlich häufiger an einer altersabhängigen Makula-Degeneration zu erkranken. Das unverdauliche Produkt mit dem verbrauchten Vitamin-Abkömmling könnte die Sache noch verschlimmern; denn es fördert vermutlich die Produktion freier Radikale im Pigmentepithel.

Allerdings haben sich auch Schutzmechanismen entwickelt. Spezielle körpereigene Enzyme entschärfen verschiedene freie Radikale. Außerdem enthält die Netzhaut in hoher Konzentration mehrere „Radikalfänger“: zum einen die beiden Carotinoide Lutein und Zeaxanthin in der Makula, zum anderen Vitamin E in den Außensegmenten der Photorezeptoren und im Pigmentepithel. Alle drei Verbindungen entnimmt der Körper der Nahrung. Besonders reich an Lutein und Zeaxanthin sind Eidotter und Blattgemüse wie Grünkohl und Spinat; viel Vitamin E liefern unter anderem Mais, Sojabohnen und Weizenkeime.

Auf Grund dieser Erkenntnisse vermuteten manche Wissenschaftler, eine entsprechende Ernährung könne das Risiko einer senilen Makula-Degeneration senken oder ihren Ausbruch hinauszögern. Epidemiologische Untersuchungen kamen in dieser Frage indes bisher zu widersprüchlichen Ergebnissen.

Allgemein anerkannte Methoden zur Behandlung der senilen Makula-Degeneration zielen darauf ab, die von der Aderhaut her einwachsenden Blutgefäße zu zerstören, weil sie die Sehkraft am stärksten gefährden. Beim Standardverfahren, der so genannten Photokoagulation, werden die Äderchen unmittelbar unter der Netzhaut mit Laserstrahlen verödet. Das energiereiche Licht passiert die transparenten Komponenten des Auges praktisch ohne Einwirkung; aber obgleich es scharf fokussiert ist, erhitzt es außer dem Ziel auch die angrenzende Netzhaut, sodass darin punktuell irrever- ▶



Bei der photodynamischen Therapie wird ein Licht absorbierender Farbstoff, ein Photosensibilisator, injiziert. Dann richtet man einen Laserstrahl auf die in die Netzhaut eingewachsenen Blutgefäße. Wo der Photosensibilisator Licht absorbiert, entstehen aggressive freie Radikale. Sie zerstören das anomale Gewebe, lassen aber die umgebende Netzhaut nahezu unbehelligt.

sible Schäden entstehen. Deshalb verspricht man sich viel von einer neueren Variante, der photodynamischen Therapie. Dazu wird zunächst ein Licht absorbierender Farbstoff intravenös injiziert. Es genügt dann ein energieärmerer Laserstrahl, der aus dem so genannten Photosensibilisator große Mengen freier Radikale entstehen lässt; erst diese töten das Gefäßgewebe ab, verschonen aber die benachbarte Netzhaut weit gehend. Das Verfahren ist seit September 2000 in Deutschland zugelassen, aber nur bei bestimmten Fällen der „feuchten“ Makula-Degeneration sinnvoll.

Die Netzhaut repariert sich selbst

Photokoagulation und photodynamische Therapie sind leider für mindestens neunzig Prozent aller Patienten irrelevant, da bei ihnen erst gar keine neuen Blutgefäße entstehen. Selbst bei der in Frage kommenden Gruppe können erneut Gefäße wuchern, sodass die Behandlung – wenn nötig und möglich – nach gewisser Zeit wiederholt werden muss. Darum verfolgt man zurzeit weitere, teils gänzlich andere therapeutische Ansätze. So werden, um die gefährlichen Gefäßwucherungen zu beseitigen oder zu hemmen, Methoden erprobt, die der Strahlentherapie von Krebskranken entlehnt sind. Anomale Blutgefäße sind unter Umständen auch mikrochirurgisch durch kleine Einschnitte in die Netzhaut zu entfernen.

Interessant ist ferner ein größerer chirurgischer Eingriff, der in Frage kommt, wenn sich die Gefäßwucherungen oder die Schäden am Pigmentepithel auf den Bereich der Sehgrube beschränken: Man löst die Netzhaut vorsichtig ab, dreht sie einige Grad um den Ursprung des Sehnervs und lässt sie wieder anwachsen. Die Stelle schärfsten Sehens liegt dann auf einem gesünderen Abschnitt des Pigmentepithels. Ohne weitere Korrektur würde das Gehirn allerdings daraufhin widersprüchliche Signale von den beiden Augen empfangen. Daher müssen an dem operierten Auge zum Ausgleich noch mehrere Muskeln so verlängert beziehungsweise verkürzt werden, dass der Augapfel sich entsprechend zurückdreht. Diese Technik wird aber erst erprobt.

Eine faszinierende Möglichkeit zeichnet sich mit Tierversuchen ab, bei denen Forscher Zellen des Pigmentepithels außerhalb des Körpers vermehren und unter der Netzhaut einpflanzen – mit großem Erfolg. Offen ist bislang, ob sich solche Zellen auch bei Menschen zuverlässig unter die Sehgrube bringen lassen, ohne dass die mikrochirurgischen Eingriffe zusätzlichen Schaden anrichten. Ob sich mit den aufgestockten Epithelzellen die Sehkraft erhalten lässt, bleibt ebenfalls abzuwarten. Zudem dürfte wie bei allen Transplantationen auch die Immunabwehr ein Problem sein. Zu umgehen wäre es, indem man nicht Zellen von Organspendern, sondern welche aus den Randbereichen der körpereigenen Netzhaut verwendete.

Manche Forscher malen sich sogar aus, die Netzhaut – die Retina – zur Selbstreparatur anzuregen. Das galt zwar lange als praktisch unmöglich, weil Retinazellen erwachsener Säugetiere durch nichts erkennen lassen, dass sie noch zu Teilungen fähig wären. Bei mehreren Fischarten aber wächst die Netzhaut während des ganzen Lebens weiter, obwohl sie ebenso kompliziert gebaut ist wie die menschliche. Der Grund dafür sind spezielle Stammzellen am Netzhautrand, die sich weiter vermehren und differenzieren. Neueren Befunden zufolge gibt es möglicherweise ähnliche Stammzellen auch am Rand der Netzhaut von Säugetieren, allerdings nur in einem Ruhezustand. Vielleicht könnte man sie aktivieren oder transplantieren, sodass sie geschädigte Bereiche der Netzhaut oder des Pigmentepithels ausbessern.

Derartige Verfahren wären jedoch so aufwendig und riskant, dass dafür wahrscheinlich nur Patienten mit schwerer, rasch fortschreitender Makula-Degeneration in Frage kämen. Für die Masse der Betroffenen sind schonendere Behandlungsmethoden wünschenswert. Gefragt sind beispielsweise Substanzen, die vor der Photooxidation durch freie Radikale schützen oder den Abbau alter Teile der Sinneszellen unterstützen. Die Entwicklung derartiger Therapeutika für die schleichend fortschreitende Form der Erkrankung mag als enorme Aufgabe erscheinen; aber wenn sich der Prozess bereits in einem frühen Stadium auch nur um zehn oder zwanzig Prozent verlangsamen ließe, wäre schon viel an Lebensqualität gewonnen. ■

Literaturhinweise

Altersabhängige Makuladegeneration. Von Frank G. Holz und Daniel Pauleikhoff (Hg.), Springer, Berlin 1997.

Age-related Macular Degeneration. Von Winfried E. Alberti et al. (Hg.), Springer, Berlin 2000.

Weblinks bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft“*

Hui Sun *und* ***Jeremy Nathans*** *arbeiten am Howard Hughes Medical Institute in Chevy Case (Maryland). Sun hat an der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland) 1998 in Molekularbiologie und Genetik promoviert. Nathans ist dort als Professor tätig.*

Wie der Mensch das Denken lernte

Mehr als 100 000 Jahre lang verfügten Frühmenschen offenbar über ein anatomisch modernes Gehirn, ohne es richtig zu nutzen. Erst der eher zufällige Erwerb von Sprache und damit der Fähigkeit zum abstrakten, symbolischen Denken entfaltete schlagartig die überragenden geistigen Fähigkeiten, die uns vom Rest der Tierwelt abheben.

Von Ian Tattersall

Wenn wir die außergewöhnlichen Fähigkeiten und Leistungen des *Homo sapiens* betrachten, können wir uns nur schwer dem Eindruck entziehen, dass wir mit einer gewissen Zwangsläufigkeit zu dem wurden, was wir sind. Ist doch das Produkt Mensch, so der verführerische Gedanke, ein solches Wunderwerk, dass es nur am Ende eines langen und zielgerichteten Verbesserungs- und Steigerungsprozesses stehen konnte. Wie hätten wir durch Zufall so werden können? Wenn wir unseren herausgehobenen Status der Evolution verdanken, muss diese doch wohl lange und schwer daran gearbeitet haben, ihr Werk zu verfeinern und zu vervollkommnen.

Und doch ist das nicht die Art, wie Evolution stattfindet. Die natürliche Auslese an sich ist kein kreativer Prozess – ja kann es gar nicht sein. Sie vermag nichts anderes, als neue Merkmale, die durch zufällige genetische Veränderungen entstanden sind, entweder zu begünstigen oder zu eliminieren. Dieser Vorgang (der selbstverständlich durch das vorher Existierende beeinflusst wird) bildet den Hintergrund aller biologischen Innovationen. Die Evolution lässt sich am besten als opportunistisch beschreiben: Sie nutzt oder verwirft bloß Möglichkeiten, wann und wo sie sich bieten; dabei kann ein und dieselbe Option je nach den jeweiligen Umweltbedingungen (im weitesten Sinne betrachtet) zum einen Zeitpunkt vorteilhaft und zu einem anderen nachteilig sein. Es gibt nichts Zielgerichtetes oder Zwangsläufiges im Evolutionsprozess. Und nichts hindert ihn daran, sich einfach umzukehren, wann immer die unstete Umwelt dies begünstigt.

Was lehrt uns nun unser bisheriges Wissen über unsere Vorfahren? Zu den wohl wichtigsten Erkenntnissen gehört die Einsicht in die Bedeutung dessen, was in den letzten Jahren zunehmend als „Exaptation“ bezeichnet wurde. Dieser Begriff bezieht sich auf Merkmale, die in einem bestimmten Kontext entstehen, dann aber in einem ganz anderen genutzt werden, und charakterisiert die Ausbreitung solcher Neuerungen in Populationen.

Das klassische Beispiel für eine Exaptation, die zu einer Adaption (Anpassung) wurde, sind Federn. Heute erlauben sie Vögeln das Fliegen. Vor Millionen von Jahren, als sich nur Insekten und Saurier in die Lüfte erheben konnten, dienten sie dagegen einer Reptiliengruppe offensichtlich zur Wärmeisolierung (und davor vielleicht zu gar nichts Besonderem). Für einen langen Zeitraum waren Federn also einfach sehr nützliche Anpassungen, um die Körpertemperatur konstant zu halten. Als Flughilfen blieben sie so lange bloße Exaptationen, bis sie viel später auch für diese neue Fähigkeit eine adaptive Funktion übernahmen. Es gibt viele vergleichbare Beispiele – genug jedenfalls, um die Möglichkeit nicht ignorieren zu können, dass sich unsere herausragenden kognitiven Fähigkeiten eventuell ähnlich wie die Federn entwickelt haben: als ein, gemessen an ihrer heutigen Rolle, sehr viel unbedeutenderes Merkmal, das ursprünglich vielleicht nur minimalen Nutzen brachte oder sogar nur als Nebenprodukt von etwas anderem entstand.

Als die ersten Cro-Magnon-Menschen vor rund 40 000 Jahren in Europa ankamen, brachten sie nachweislich bereits das mehr oder weniger vollständige Repertoire von Verhaltensweisen mit, das den modernen Menschen von jeder anderen Spezies unterscheidet, die je existiert hat. Plastiken, Gravuren, Malerei, Körperschmuck, Musik, der Gebrauch abstrakter Zeichen, der kundige Umgang mit verschiedenen Materialien, ▶



NOVOST / PHOTO RESEARCHERS, INC.

Vor rund 28 000 Jahren wurde dieser sechzig Jahre alte Mann bestattet. Das prunkvolle Begräbnis zeugt von den rituellen Praktiken und Glaubensvorstellungen in der menschlichen Gemeinschaft, der er angehörte.

Als letzte Ruhestätte diente eine wohlgeformte Erdgrube. Der Tote trug Armreifen, Halsketten, Schmuckanhänger und ein Gewand, auf das hunderte Perlen aus Mammut-Elfenbein aufgenäht worden waren. Hinzu kamen weitere wertvolle Grabbeigaben.

An derselben Fundstelle bei Sungir in Russland wurden auch zwei Jugendliche beigesetzt. Diese drei Gräber gehören zu den ersten und prunkvollsten Beispielen frühmenschlicher Bestattungen in Europa.

ausgeklügelte Bestattungsrituale und filigrane Verzierungen von Gebrauchsgegenständen – dies und vieles mehr waren integrale Bestandteile des täglichen Lebens beim frühen *Homo sapiens*. Eindrucksvolle Belege dafür liefern etliche mehr als 30000 Jahre alte Fundstellen in Europa.

Was all diese Verhaltensweisen am deutlichsten verbindet, ist ihre gemeinsame Wurzel in der Fähigkeit zu abstraktem, symbolischem Denken. Es kann kaum Zweifel daran geben, dass es dieses grundsätzliche Merkmal war und nicht der Erwerb irgendeiner der angeführten (oder nicht genannten) spezifischen Fähigkeiten, die hinter dem Aufkommen „moderner" Elemente im Verhaltensrepertoire unserer Vorfahren steht. Mehr noch: Dieses neue geistige Potenzial kontrastiert denkbar krass mit den eher bescheidenen kulturellen Leistungen der Neandertaler, die in Europa und West-Asien beheimatet waren und von den Neuankömmlingen erstaunlich schnell verdrängt wurden. Zweifellos unterschied sich das Verhalten der Cro-Magnons – so wie das unsrige – grundlegend von dem aller früher existierenden Menschenarten. Es ist dabei absolut keine Herabsetzung der Neandertaler (oder irgendeiner der anderen heute ausgestorbenen Menschenformen, deren Kenntnisse und Fertigkeiten auf ihre Art absolut bewundernswert waren), wenn wir sagen, dass sich mit dem Erscheinen des abstrakt denkenden und zu symbolischem Handeln fähigen modernen *Homo sapiens* auf der Erde eine neue Ebene des Seins manifestiert hat. Zu erklären, wie es dazu kam, ist von allen Fragen der Biologie die faszinierendste und verwirrendste zugleich.

Das Auftreten höherer geistiger Fähigkeiten war keineswegs das Endergebnis einer allmählichen Steigerung der Leistungsfähigkeit des Gehirns, sondern das plötzliche Nutzbarmachen eines brach liegenden Potenzials

Eine Schwierigkeit erwächst dabei daraus, dass in der menschlichen Ahnenreihe kein Zusammenhang zwischen dem Aufkommen moderner Verhaltensweisen und anatomischer Modernität zu bestehen scheint. Es gibt Hinweise, dass vor rund 100000 Jahren in der Levante (Vorderer Orient) Menschen lebten, die morphologisch bereits genauso aussahen wie wir. Doch in auffallendem Gegensatz zu den Ereignissen in Europa hielten sich die Neandertaler nach dem Erscheinen des anatomisch modernen Menschen in dieser Gegend noch für 60000 Jahre. Außerdem waren während dieser langen Zeit der Koexistenz (wie auch immer sie aussah, und ehrlich gesagt haben wir keine Ahnung, wie diese verschiedenen Hominiden es anstellten, das Gebiet in all den Jahrtausenden miteinander zu teilen) die Lebens- und Verhaltensweisen der beiden Frühmenschenarten mehr oder weniger identisch; zumindest deuten die Werkzeuge, die sie machten, und die bisher untersuchten archäologischen Fundstätten darauf hin. Anscheinend verschwanden die Neandertaler erst vor etwa 45000 Jahren aus dieser Region – genau zu der Zeit also, als in der Levante erstmals Steinwerkzeuge vom Cro-Magnon-Typ auftauchten. Ziemlich sicher war es also die Umsetzung abstrakter geistiger Fähigkeiten, die unserer Art den entscheidenden – und für die Neandertaler fatalen – Vorsprung verschafft hat. Das zwingt geradezu zu dem Schluss, dass der anatomisch moderne *Homo sapiens* schon viel früher auf der Bildfläche erschien als der auch in seinem Verhalten neuzeitliche Mensch. Obwohl dies im ersten Moment ziemlich unlogisch klingen mag (wäre es denn nicht viel plausibler, wenn das Auftreten einer neuen Verhaltensweise mit dem Erscheinen einer neuen Menschenart zusammenfiele?), ergibt es in Wahrheit sehr wohl einen Sinn. Denn wo sollen sich wie auch immer geartete neue Verhaltensweisen etablieren, wenn nicht innerhalb einer bereits existierenden Spezies?

Gehirnvolumen und Geisteskraft

Üblicherweise gilt: Wer die geistigen Leistungen einer Wirbeltierart verstehen will, sollte als Erstes deren Gehirn betrachten. Bei unserer eigenen Familie ist das jedoch wenig aufschlussreich. *Homo neanderthalensis* verfügte über ein Gehirn, das genauso groß war wie das unsrige. Allerdings befand es sich in einem deutlich anders geformten Schädel. Während die vielfältigen archäologischen Funde sehr genauen Aufschluss über die völlig unterschiedlichen Verhaltensweisen von Neandertalern und Cro-Magnons geben, tun sich Gehirnspezialisten schwer, in Ausgüssen von Schädeln der beiden Hominiden-Arten irgendwelche Strukturen an der Oberfläche des Gehirns zu identifizieren, die auf einen wichtigen funktionalen Unterschied hindeuten könnten. Demnach lässt sich das Auftreten höherer geistiger Fähigkeiten nicht einfach als Höhepunkt einer allmählichen Steigerung der Leistungsfähigkeit des Gehirns betrachten. Es geschah etwas anderes als ein letztes physisches Tuning des Denkapparates. Natürlich musste, als der modern aussehende Mensch die Weltbühne betrat, schon der Grundstein für die Realisierung fortgeschrittener kognitiver Prozesse gelegt sein. Das heißt aber nicht, dass auch bereits ein spezifischer neuraler Mechanismus für diese Prozesse existierte.

An dieser Stelle sei nochmals ausdrücklich daran erinnert, dass neue Strukturen nicht zielgerichtet *für* etwas Bestimmtes entstehen. Sie ergeben sich zufällig als Nebenprodukte von Kopierfehlern, die ständig bei der Weitergabe des Erbguts von Generation zu Generation auftreten. Die natürliche Auslese ist ganz sicher keine schöpferische Kraft, die von sich aus neue Strukturen ins Leben ruft. Sie kann nur bei vorgegebenen Varianten ansetzen, die sie dann entweder als nachteilig eliminiert oder als günstig fördert.

Wir sprechen gerne von Anpassungen, da dies erklären hilft, wie und warum bestimmte Neuerungen aufgetaucht sind und sich im Evolutionsverlauf durchgesetzt haben. Aber in Wahrheit müssen alle neuen genetischen Varianten als Exaptationen entstanden sein. Der Unterschied zwischen beiden ist elementar: Während Adaptionen Merkmale sind, die spezifische und klar definierbare Funktionen erfüllen (was sie natürlich erst können, sobald es sie gibt), handelt es sich bei Exaptationen lediglich um Merkmale, die spontan entstanden sind und zunächst nur potenziell zur Verfügung stehen, um im weiteren Verlauf der Entwicklung eine neue Funktion zu übernehmen. Das ist ein gängiges Phänomen, da viele neue bio-



logische Strukturen aus keinem anderen Grund erhalten bleiben als dem, nicht weiter zu stören.

In diesem Kontext müssen wir zwei Dinge klar auseinander halten: auf der einen Seite die Evolution des menschlichen Gehirns zu dem uns vertrauten Organ und auf der anderen Seite das Auftreten fortgeschrittener geistiger Fähigkeiten. Zweifellos hat sich in den vergangenen zwei Millionen Jahren das durchschnittliche Gehirnvolumen vergrößert; doch das sagt nicht viel darüber, wie sich unser Verstand tatsächlich entwickelt hat. Das Beispiel der Neandertaler und (vielleicht noch mehr) der zwar anatomisch, aber noch nicht in ihrem Verhalten modernen Menschen lehrt, dass herausragende kognitive Fähigkeiten eben nicht einfach aus einer Extraportion grauer Zellen erwachsen – als ob es nur eines letzten Quäntchens Gehirnmasse bedurft hätte, die bis dahin bestehenden geistigen Grenzen zu überschreiten. Genauso wenig kann die Bildung irgendwelcher wichtigen neuen Gehirnstrukturen eine Rolle gespielt haben, da sich der Aufbau des Gehirns bei allen höheren Primaten in den Grundzügen bemerkenswert gleicht. Stattdessen wurde ein exaptiertes Organ, seit wer-weiß-wann ausgestattet mit einem vernachlässigten Potenzial für abstraktes Denken, eines Tages urplötzlich für das verwendet, was seine wahre Stärke ist.

Leider liegt bisher im Dunkeln, was genau dem Gehirn das Potenzial für anspruchsvolle geistige Tätigkeiten verschafft hat. Das rührt großenteils daher, dass wir zwar eine Menge über den Aufbau dieses Organs sowie darüber wissen, welche Hirnregionen bei der Erledigung bestimmter Aufgaben jeweils aktiv sind, aber keine Ahnung haben, wie das Gehirn die Unmenge von elektronischen und chemischen Signalen in das umwandelt, was wir gemeinhin unter Bewusstsein oder Denkmustern verstehen. Das zu ergründen ist aber entscheidend, wenn wir jemals wirklich verstehen wollen, was es ausmacht, ein (ich benutze den Begriff mit Bedacht) vernunftbegabtes Wesen zu sein.

Schlummerndes Potenzial

Gleichwohl ist es möglich, auf einer allgemeinen Ebene über die Evolution des menschlichen Denkvermögens zu sprechen. Beispielsweise besagt eine gängige Theorie, dass irgendwann – vielleicht vor 60000 bis 50000 Jahren – in der menschlichen Ahnenreihe eine Spezies auftauchte, die über die neuartige Fähigkeit zum symbolischen Ausdruck verfügte. Demnach hätte diese neue Spezies ein modifiziertes Gehirn besitzen müssen, das moderne Verhaltensmuster erlaubte. Es wäre schön, das glauben zu können, weil es das Problem in gewisser Hinsicht vereinfachen würde. Doch die Zeit reichte für dieses Szenario einfach nicht aus. Wenn die Erklärung zuträfe, hätte eine neue menschliche Spezies, die physisch identisch mit einer bereits existierenden, ihr aber intellektuell überlegen war, auftauchen, sich in unglaublich kurzer Zeit über die gesamte Alte Welt ausbreiten und dabei ihre Vorgängerspezies völlig auslöschen müssen. Doch es gibt in der – zugegebenermaßen unvollständigen – Reihe archäologischer Zeugnisse aus dieser Zeit absolut keinen Hinweis darauf, dass so etwas passiert sein könnte. Damit bleibt offenbar nur eine Alternative. ▶

Bildliche Darstellungen von eiszeitlichen Tieren in Verbindung mit abstrakten Symbolen künden von den höheren geistigen Fähigkeiten der ersten „modernen“ Menschen. Als Beispiel ist hier ein Auerochse aus der Höhle von Lascaux in Frankreich wiedergegeben. Abstrakte Zeichen befinden sich oberhalb des Nacken- und Rückenbereiches und auf den Hüften des Tieres. Die Malereien in Lascaux entstanden vor etwa 17000 Jahren.

Statt nach irgendeiner anatomischen Neuerung sollten wir vielleicht nach einer Art kulturellem Auslöser für die Entstehung unseres außergewöhnlichen Denkvermögens suchen. Wenn das moderne menschliche Gehirn mit all seinen Möglichkeiten zusammen mit der modernen Schädelform vor etwa 150 000 bis 100 000 Jahren entstanden ist, hätte es für eine beträchtliche Zeit als Exaptation existieren können, während die neuralen Strukturen zunächst weiter in der bisherigen Weise arbeiteten. Leider sind die Zeugnisse, die direkte Informationen über den Ursprung und die Verbreitung des *Homo sapiens* liefern, weit spärlicher, als uns lieb ist. Zumindest aber wissen wir, dass unsere Spezies ungefähr in dem genannten Zeitraum auftauchte, vermutlich in Afrika. Und wir wissen auch, dass sich der *Homo sapiens* von seinem Entstehungsort aus (wo auch immer der genau lag) ziemlich schnell über die Alte Welt ausbreitete.

Wenn es zu einem Zeitpunkt, sagen wir vor 70 000 bis 60 000 Jahren, eine kulturelle Neuerung in irgendeiner menschlichen Population gab, die das schon lange schlummernde Potenzial für abstraktes Denken im menschlichen Gehirn aktivierte, lässt sich die schnelle Verbreitung symbolträchtiger Handlungen mühelos durch den simplen Mechanismus kultureller Überlieferung erklären. Es ist weit überzeugender (und gewiss auch befriedigender) festzustellen, dass sich die neuen Verhaltensweisen sehr schnell in Populationen ausbreiteten, die bereits die Voraussetzung zu ihrer Übernahme mitbrachten, als anzunehmen, dass die weltweite Verbreitung der einzigartigen menschlichen Fähigkeiten durch einen vollständigen Austausch der Bevölkerung zu Stande kam. Was für ein Blutbad hätte das bedeutet! Dagegen ist der kulturelle Austausch zwischen menschlichen Populationen in der Geschichte vielfach dokumentiert und liefert offensichtlich die einleuchtendste Erklärung für den schnellen Erfolg symbolisch vermittelter menschlicher Verhaltensweisen. Allerdings fehlt noch eine plausible Antwort auf die Frage, welches die als Auslöser wirkende kulturelle Neuerung gewesen sein könnte.

Statt nach irgendeiner anatomischen Neuerung sollten wir vielleicht nach einem kulturellen Auslöser für die Entstehung unseres überragenden Denkvermögens suchen

Bewusstsein und symbolisches Denken

Wenn wir von „symbolischen Prozessen“ im Gehirn oder beim Denken sprechen, beziehen wir uns auf unsere Fähigkeit, Einzelheiten unserer Erfahrung zu abstrahieren und durch mentale Symbole auszudrücken. Sicherlich verfügen auch andere Arten in einem gewissen Sinne über Bewusstsein, aber soweit wir wissen, leben sie in der Welt einfach so, wie sie sich ihnen darstellt. Vermutlich erscheint ihnen ihre Umgebung weitgehend als Kontinuum und nicht wie uns Menschen als Ort, der in eine Vielzahl von Einzelelementen zerfällt, denen wir individuelle Bezeichnungen geben. Durch ein solches Separieren von Bestandteilen vermögen wir die Welt und einzelne Aspekte davon in unserem Bewusstsein immer wieder neu zu erschaffen. Die Voraussetzung dafür ist unsere Fähigkeit, für Dinge, die wir in uns selbst und um uns herum wahrnehmen, geistige Symbole zu kreieren und mit ihnen zu hantieren. Vertreter anderer Spezies zeigen oft eine hoch entwickelte Fähigkeit zu intuitivem Schlussfolgern, sodass sie auf Umweltreize in recht komplexer Weise reagieren können. Aber nur Menschen sind fähig, geistige Symbole beliebig zu kombinieren und neu zu verknüpfen und sich Fragen zu stellen wie „Was wäre wenn?“ Es ist diese Fähigkeit, auf der unsere hoch gepriesene Kreativität beruht.

Selbstverständlich bildet die Intuition nach wie vor einen Grundpfeiler unseres Urteilsvermögens. Das abstrakte Denkvermögen kam nur dazu. Beispielsweise ist ein intuitives Erfassen der Beziehungen zwischen Objekten und Ideen als Voraussetzung für wissenschaftliche Kreativität mit ziemlicher Sicherheit ebenso wichtig wie die symbolische Darstellung von Zusammenhängen. Letztlich ist es die einmalige Kombination von beidem, die Wissenschaft, Kunst oder Technik erst möglich macht. Zweifellos kann ein Lebewesen mit intuitivem Schlussfolgern alleine schon viel erreichen. Das beweisen, wie mir scheint, die Neandertaler. In ihrem reichhaltigen archäologischen Vermächtnis finden sich zwar nur äußerst magere Hinweise auf abstrakte Fähigkeiten; Symbole hatten offensichtlich keinen großen Stellenwert in ihrem Dasein. Dennoch erscheinen ihre Leistungen höchst beachtlich. Soweit sich das beurteilen lässt, beherrschten sie die Natur besser als alle ihre Vorgänger in der Menschheitsgeschichte. Neidlos muss man ihnen zugestehen, mit ihren rein intuitiven Fähigkeiten die komplexeste Lebensweise erreicht zu haben, die auf dieser Basis überhaupt möglich sein dürfte.

Das wirft unweigerlich die Frage auf, deren Antwort jeder gerne wüsste: Konnten die Neandertaler sprechen? Viele von uns wollen – vor allem angesichts der ausgefeilten Steinwerkzeuge, welche die Neandertaler mit so viel Geschick herstellten – kaum glauben, dass sie nicht über Sprache verfügten. Wie hätten solche bemerkenswerten Fertigkeiten von einer Generation zur nächsten weitergegeben werden sollen, wenn nicht durch sprachliche Vermittlung?

Vor gar nicht langer Zeit hat ein japanisches Forscherteam einen ersten Versuch unternommen, diese Frage zu beantworten. Es teilte eine Anzahl von Studenten in zwei Gruppen auf. Der einen brachten Archäologen anhand ausführlicher verbaler Erläuterungen in Verbindung mit praktischen Demonstrationen bei, wie man ein typisches Neandertaler-Steinwerkzeug anfertigt. Der anderen Gruppe wurde die Technik nur wortlos vorgeführt. Eines machte das Experiment auf eklatante Weise deutlich: Wie schwer es überhaupt ist, Steinwerkzeuge herzustellen; einige Versuchsteilnehmer lernten es nie. Noch bemerkenswerter aber war, dass im Ergebnis zwischen beiden Gruppen praktisch kein Unterschied bestand – weder in der Geschwindigkeit, mit der die Studenten die sie gelehrte Fertigkeit erwarben, noch im Geschick, das sie am Ende zeigten. Offenbar reicht zur Weitergabe auch anspruchsvoller Herstellungstechniken für Steinwerkzeuge stummes Vorführen völlig aus.


ALEXANDER MARSHACK

Obwohl an diesem Experiment natürlich heutige Menschen und keine Neandertaler teilnahmen, zeigt das Ergebnis doch einmal mehr überdeutlich, welch ein fundamentaler Irrtum es ist, davon auszugehen, dass unsere Art der Kommunikation die einzig effektive sei. Das soll natürlich nicht heißen, dass die Neandertaler keine Form der lautlichen Verständigung hatten; vielleicht war sie sogar recht differenziert. Das Kommunizieren mit Lautäußerungen ist unter den Wirbeltieren schließlich gang und gäbe. Es kann kaum Zweifel daran geben, dass die Neandertaler in einem allgemeinen Sinn gesprochen haben. Was sie jedoch fast mit Sicherheit nicht kannten, war Sprache in der uns heute vertrauten Form.

Sprache und Emergenz des menschlichen Geistes

Wenn man einen Aspekt menschlicher Geistestätigkeit benennen sollte, der mehr als jeder andere mit symbolischen Prozessen zusammenhängt, dann wäre das sicherlich unser Gebrauch von Sprache. Sie ist zweifellos die Gehirnfunktion mit dem höchsten Abstraktionsgrad. Ohne sie scheint Denken, wie wir es kennen, schlichtweg unvorstellbar; denn Worte fungieren als Grundbausteine unserer bewussten Gedanken und Überlegungen. Sie sind das Medium, mit dem wir anderen Menschen unsere Vorstellungen mitteilen und – als hochgradig soziale Wesen – zu beeinflussen versuchen, was in ihren Köpfen vorgeht. Wenn wir also nach einem bestimmten kulturellen Auslöser suchen, der die Tür zu symbolischem Denken aufgestoßen hat, dann ist die Erfindung der Sprache der offensichtlichste Kandidat. Ja es ist vielleicht sogar der einzig plausible, der sich bisher aufspüren ließ.

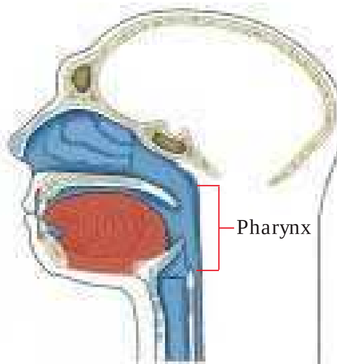
Was könnte passiert sein? Den Schlüssel zu einem tieferen Verständnis liefert wieder der Begriff Exaptation; denn die Sprache ist ein einzigartiges Kommunikationsmittel, das sich allem Anschein nach nicht aus einer bei Affen schon ansatzweise vorhandenen „Ursprache“ entwickelt hat und sicher auch nicht auf direktem Wege entstanden ist. Trotzdem haben Wissenschaftler die Ansicht vertreten, die allgemeine Fähigkeit zum Spracherwerb sei so tief und universell in der menschlichen Psyche verankert, dass es dafür gleichsam eine feste Verdrahtung in jedem regulären Gehirn geben müsse, entstanden nach dem „normalen“ darwinschen Prinzip von Anpassung durch natürliche Auslese.

Selbstverständlich wird die Sprache nicht in jeder Generation neu erfunden, aber sie muss immer wieder frisch erworben werden: Das Erlernen der Muttersprache(n) ist ein ganz natürlicher, wenngleich erstaunlicher Teil des Entwicklungsprozesses, den jedes Kind beim Heranwachsen durchläuft. Anders gesagt, lässt sich die Existenz eines „Sprachinstinktes“ beim Menschen nicht leugnen. Erklärungsbedürftig bleibt aber nicht nur, wie diese angeborene Prädisposition entstanden ist, sondern auch, wie sie so schnell und plötzlich in Erscheinung treten konnte.

Wir haben gesehen, dass die natürliche Auslese keine kreative Kraft ist und von sich aus nichts erschaffen, sondern nur aus dem, was bereits existiert, Kapital schlagen kann. In gewissem Sinn macht das die Dinge einfacher, denn soweit wir sagen können, gibt es keinerlei Indizien, dass die Fähigkeit zum abstrakten Denken das Endergebnis einer langsamen Entwicklung war, wie man sie bei einer Selektion im darwinschen Sinne erwarten würde. Stattdessen muss nach einer langen – und noch kaum verstandenen – Zeit der ziellosen Vergrößerung und Neuordnung des Gehirns in der menschlichen Ahnenreihe etwas aufgetaucht sein, das dem Erwerb von Sprache den Weg ebnete. Diese Neuerung konnte nur auf dem Phänomen der Emergenz beruhen, wobei eine zufällige Kombination bereits existierender Elemente etwas völlig Unerwartetes hervorbringt. Das klassische Beispiel einer emergenten Qualität liefert Wasser; die meisten seiner besonderen Eigenschaften sind ab- ▶

Vor über 32 000 Jahren aus Mammut-Elfenbein geschnitzt, ist diese filigrane, weniger als fünf Zentimeter große Figur wohl der älteste bekannte Beleg künstlerischer Tätigkeit. Sie stammt aus der Vogelherd-Höhle bei Stetten im Lonetal (Schwäbische Alb). Die elegante Linienführung der Skulptur drückt die typischen Merkmale ihres Gegenstandes wohl besser aus, als es eine exakte Wiedergabe der stämmigen Proportionen damaliger Pferde tun würde.

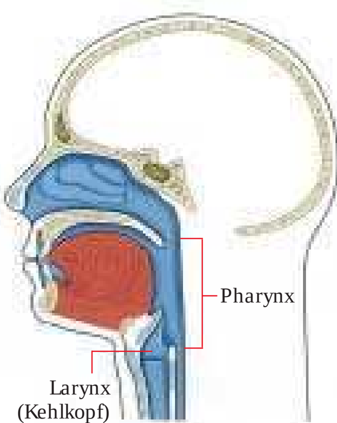
Neandertaler



ZEICHNUNG VON DIANA SALLES, NACH ENTWÜRFEN VON JEFFREY LAITMAN, © IAN TATTERSALL

Der Neandertaler hatte den gleichen kurzen Rachenraum (Pharynx) wie die Menschenaffen und konnte deshalb nur ein begrenztes Lautspektrum produzieren.

moderner Mensch



ZEICHNUNG VON DIANA SALLES, NACH ENTWÜRFEN VON JEFFREY LAITMAN, © IAN TATTERSALL

Erst der verlängerte Rachenraum des modernen Menschen ermöglicht die volle Bandbreite von Lauten, die für eine artikulierte Sprache notwendig sind.

solut unvorhersehbar, wenn man das Verhalten seiner Bausteine Wasserstoff und Sauerstoff betrachtet. Die Kombination dieser Elemente ergibt etwas völlig Neues, das sich erst im Nachhinein erklären lässt. In Verbindung mit der Exaptation bildet die Emergenz einen leistungsfähigen Evolutionsmechanismus – eine echte Triebkraft, die zufällig entstandene Innovationen in neue Richtungen lenkt.

Im Falle des allen heutigen Menschen angeborenen Sprachvermögens steht zu vermuten, dass sich zu Beginn bei irgendeiner Population in der menschlichen Ahnenreihe irgendein neuraler Mechanismus änderte. Dieser Wandel war aus genetischer Sicht vermutlich eher geringfügig und hatte wahrscheinlich überhaupt nichts mit Anpassung im klassischen Sinne zu tun. Da sich während der frühen Kindheitsentwicklung das Gehirn durch die Bildung spezifischer Signalwege aus einer undifferenzierten Masse wahllos miteinander verknüpfter Nervenzellen selbst strukturiert, beruhte dieses Ereignis womöglich sogar auf entwicklungssteuernden Reizen und fand somit auf der epigenetischen statt der genetischen Ebene statt. Wie auch immer – jedenfalls scheint es keine Spuren in irgendwelchen Fossilien hinterlassen zu haben, obwohl seine Auswirkung auf die archäologischen Zeugnisse der Cro-Magnons und ihrer Nachfahren letztlich gewaltig war.

Umformung des Rachenraums

Wie der Schlussstein in einem Rundbogen zwar nur ein unscheinbarer Teil der Gesamtstruktur ist, aber entscheidend zu ihrer Stabilität beiträgt, war diese Neuerung (was immer sie gewesen sein mag; und wir sind noch weit davon entfernt, sie zu verstehen) die finale physische Komponente, die erst vorhanden sein musste, um Sprache und symbolhaftes Denken zu ermöglichen – sowie alles, was daraus mit so schicksalhaften Konsequenzen für die Welt erwuchs. Nachdem diese Innovation einmal erfolgt war, konnte das darin steckende Potenzial, ohne Schaden zu verursachen, so lange brach liegen, bis es durch einen kulturellen Anstoß innerhalb einer bestimmten Population aktiviert wurde.

Ziemlich sicher war dieser Anstoß die Erfindung der Sprache, auch wenn das schwer zu beweisen ist. Jeder von uns kann heute sprechen, was an sich schon zeigt, wie überaus vorteilhaft diese Errungenschaft gewesen sein muss. Und wenn sie so vorteilhaft war, wie wir gerne glauben, nimmt es kaum wunder, dass sich die Sprache samt den zugehörigen, an Symbolen orientierten Verhaltensmustern in der Folge sehr schnell in der menschlichen Bevölkerung ausbreiten konnte.

Wie diese schicksalsträchtige Neuerung genau erfunden wurde, ist eine andere Frage, über die zu spekulieren jenseits meiner Fachkompetenz liegt. Aber nachdem der neuronale Boden für Sprache bereitet war, kann sie auf vielerlei Arten entstanden sein. Die von mir bevorzugte Variante ist, dass eine Urform nicht von Erwachsenen erfunden wurde, sondern von Kindern. Angesichts der Tatsache, dass das Gehirn keine statische Struktur wie etwa ein Gummiball ist, sondern eine dynamische Einheit, die sich während des Heranwachsens (und bei geeigneten Stimuli sogar während des ganzen Lebens) unablässig selbst neu organisiert, scheint der Gedanke gar nicht so abwegig, dass ein rudimentärer Vorläufer der Sprache, wie wir sie heute kennen, anfangs in einer Gruppe von Kindern auf spielerische Weise entstand. Eine solche Vorform mag aus Lauten oder Worten bestanden haben, die zusätzliche Bedeutung erlangten, wenn sie aneinander gereiht wurden. Es ist schwer vorstellbar, dass diese Erfindung, nachdem sie einmal gemacht war, nicht schließlich von der Gesellschaft als Ganzer aufgegriffen worden wäre.

Ein Beispiel aus dem Tierreich mag dies illustrieren. Auf einer japanischen Insel pflegten Forscher am Strand lebende Makaken mit hingeworfenen Süßkartoffeln zu füttern. Wenn die Tiere die Delikatessen aufhoben, klebte gewöhnlich eine Menge Sand daran. Schon nach kurzer Zeit begannen junge Affen, ihn im Meer abzuwaschen. Und nach einer Weile machten es ihnen schließlich die erwachsenen Tiere nach: erst die Weibchen und als Letztes die dominanten Männchen. Nur einige ältere, besonders hochrangige Patriarchen ließen sich nie zu diesem neumodischen Verhalten herab und blieben bei der gewohnten sandigen Kost. Aber eine gute Idee ist nun einmal eine gute Idee – und es fällt schwer, zu glauben, dass sich im Fall der Sprache das Prinzip, Worte mit Objekten und Ideen in Verbindung zu bringen, nicht auch ziemlich schnell in der Gesellschaft verbreitet hätte, nachdem es einmal entdeckt war.

Dennoch bedeutete der Übergang von einer nonverbalen Lebensweise zu dem uns vertrauten Leben mit Sprache einen riesigen geistigen wie praktischen Sprung. Vermutlich entstand die Syntax mit ihren Regeln zur Konstruktion ganzer Sätze in einem eigenen, späteren Schritt, der durch die Schaffung von Wort-Objekt-Verbindungen aber vielleicht zwangsläufig vorgegeben war. Generell wäre die Annahme ziemlich unglaubwürdig, die Entwicklung von der unartikulierten zur wohlgesetzten Sprache, wie wir sie kennen, hätte sich auf einmal vollzogen.

Viel plausibler scheint ein mehrstufiger Prozess ähnlich den Schritten, in denen Kinder Sprache erlernen: Am Anfang steht der sehr schnelle Aufbau eines Wortschatzes, dann folgt das Erlernen von Syntaxregeln und als Letztes kommt die korrekte Bildung ganzer, wohlstrukturierter Sätze. Die Entstehung der Sprache war zweifellos ein sehr komplizierter Vorgang – so kompliziert, dass er aus unserer Sicht vielleicht gar unmöglich schiene, wenn wir nicht *wüssten,* dass er stattfand. Natürlich hat sich die Sprache nach ihrer Erfindung noch stark verändert, ist weitaus vielschichtiger und differenzierter geworden, während sie ihren Siegeszug in der Menschheit antrat. Dennoch weist sie heute unabhängig von der jeweiligen Kultur überall eine gemeinsame Grundstruktur auf. Das kann nur daran liegen, dass schon lange bevor die Sprache selbst aufkam, die Basis dafür in jedem anatomisch modernen Menschen angelegt war.

Aber da bleibt noch ein weiterer Faktor zu erklären. Um sprechen zu können, braucht man ein Gehirn, das dem Sprechapparat sagt, was er tun muss. Genauso wichtig ist jedoch ein Sprechapparat, der die Anweisungen des Gehirns zu befolgen vermag. Der ursprüngliche Vokaltrakt der Primaten taugt dafür in keinster Weise. In der Tat sind Menschen als einzige Lebewesen überhaupt physisch in der Lage, Laute zu erzeugen, wie sie für eine artikulierte Sprache benötigt werden (allerdings können einige Vögel Sprache imitieren).

Diese Fähigkeit hat ihren Preis. Der Sprechapparat besteht aus dem Kehlkopf samt Stimmbändern, dem darüber liegenden röhrenförmigen Rachenraum, der sich zu den Mund- und Nasenhöhlen öffnet, und schließlich der Zunge mit den umgebenden Strukturen. Die Stimmbänder erzeugen Basislaute, die im Rachenraum und in den nachfolgenden Luftwegen abgewandelt werden. Typischerweise befindet sich bei Säugetieren einschließlich der Menschenaffen – und selbst noch bei menschlichen Säuglingen – der Kehlkopf im oberen Halsbereich, was den Rachenraum verkürzt und so die Möglichkeiten zur Abwandlung von Stimmlauten einschränkt. Dagegen liegt der Kehlkopf bei erwachsenen Menschen tiefer im Hals; der dadurch verlängerte Rachenraum schafft die Voraussetzung für eine bessere Lautmodulation. Das ermöglicht ein breites Spektrum an Lauten und Tönen, aber der schon erwähnte Preis dafür ist, dass es ein gleichzeitiges Atmen und Schlucken unmöglich macht – mit dem fatalen Risiko, beim Essen zu ersticken.

Das allein zeigt, dass die besondere Gestaltung des menschlichen Vokaltraktes zum Ausgleich einen deutlichen anderen Vorteil bieten musste. Leider ist das aber nicht die Fähigkeit zu sprechen. Woher ich das weiß? Nun, das „Dach“ unseres Vokaltraktes bildet gleichzeitig die Schädelbasis. Deshalb können wir bei Fossilfunden, bei denen dieser Schädelbereich erhalten geblieben ist, in groben Zügen rekonstruieren, wie der jeweilige Lautbildungsapparat zu Lebzeiten ausgesehen hat.

Die Kombination von tief gelegenem Kehlkopf und langem Rachen verrät sich durch eine Krümmung der Schädelbasis. Erste Anzeichen dafür finden sich bereits vor fast zwei Millionen Jahren bei *Homo ergaster;* außerdem belegt der Schädel eines *Homo heidelbergensis* aus Äthiopien, dass die Schädelbasis praktisch schon vor etwa 600 000 Jahren ihren heutigen Krümmungsgrad erreicht hatte. Demnach war damals bereits ein Stimmapparat ausgebildet, der seine Träger zur Lauterzeugung für artikulierte Sprache befähigte – mehr als eine halbe Million Jahre, bevor es einen anderen, unabhängigen Beleg dafür gibt, dass unsere Vorfahren sprachen oder so etwas wie Sprache benutzten.

Der Stimmapparat des erwachsenen Menschen kann somit ursprünglich keine Anpassung gewesen sein, die dem Sprechen im heutigen Sinne diente, wenngleich er vielleicht für eine „prälinguale“ Form der Lautverständigung von Vorteil war. Wofür war er aber dann gut?

Das bringt uns unweigerlich zurück zum Begriff der Exaptation. Trotz ihrer Nachteile entstand eine Krümmung der Schädelbasis und blieb für eine sehr lange Zeit bestehen, bevor sie in den Dienst der Sprache gestellt wurde. Vielleicht begünstigte sie während dieser langen Zeit wirklich die Ausprägung gewisser archaischer Formen von Sprache – Formen, die wir schwerlich näher charakterisieren können. Vielleicht brachte sie aber auch irgendeinen Vorteil beim Atmen – ein Punkt, der bei ausgestorbenen Hominidenarten noch kaum untersucht ist. Wie auch immer bleibt der Schluss, dass das Auftreten von Sprache und die damit verbundenen anatomischen Veränderungen als solche zunächst nicht das Ergebnis einer natürlichen Auslese waren, auch wenn sie sich im Nachhinein als höchst vorteilhaft erwiesen haben.

Momentan haben wir somit nicht den Hauch einer Chance, auch nur annähernd überzeugend zu erklären, wie wir zu den außergewöhnlichen Wesen wurden, die wir sind, ohne auf den unscheinbaren Mechanismus der Exaptation zurückzugreifen. Sicherlich sind wir nicht das Ergebnis eines stetigen, raffinierten Verfeinerungsprozesses über Zigtausende von Jahren hinweg. Ein Großteil unserer Geschichte war eine Abfolge von glücklichen Zufällen. Die Natur hat niemals „beabsichtigt“, uns in die dominierende Stellung innerhalb des Organismenreiches zu befördern, in der wir uns – warum auch immer – heute befinden.

Bis zu einem hohen Grade sind wir nur zufällige Reisende, auf wundersamen Pfaden unterwegs im Reich der Natur. Aber natürlich macht uns das nicht weniger bemerkenswert. Und noch weniger sind wir deshalb frei von Verantwortung. ■

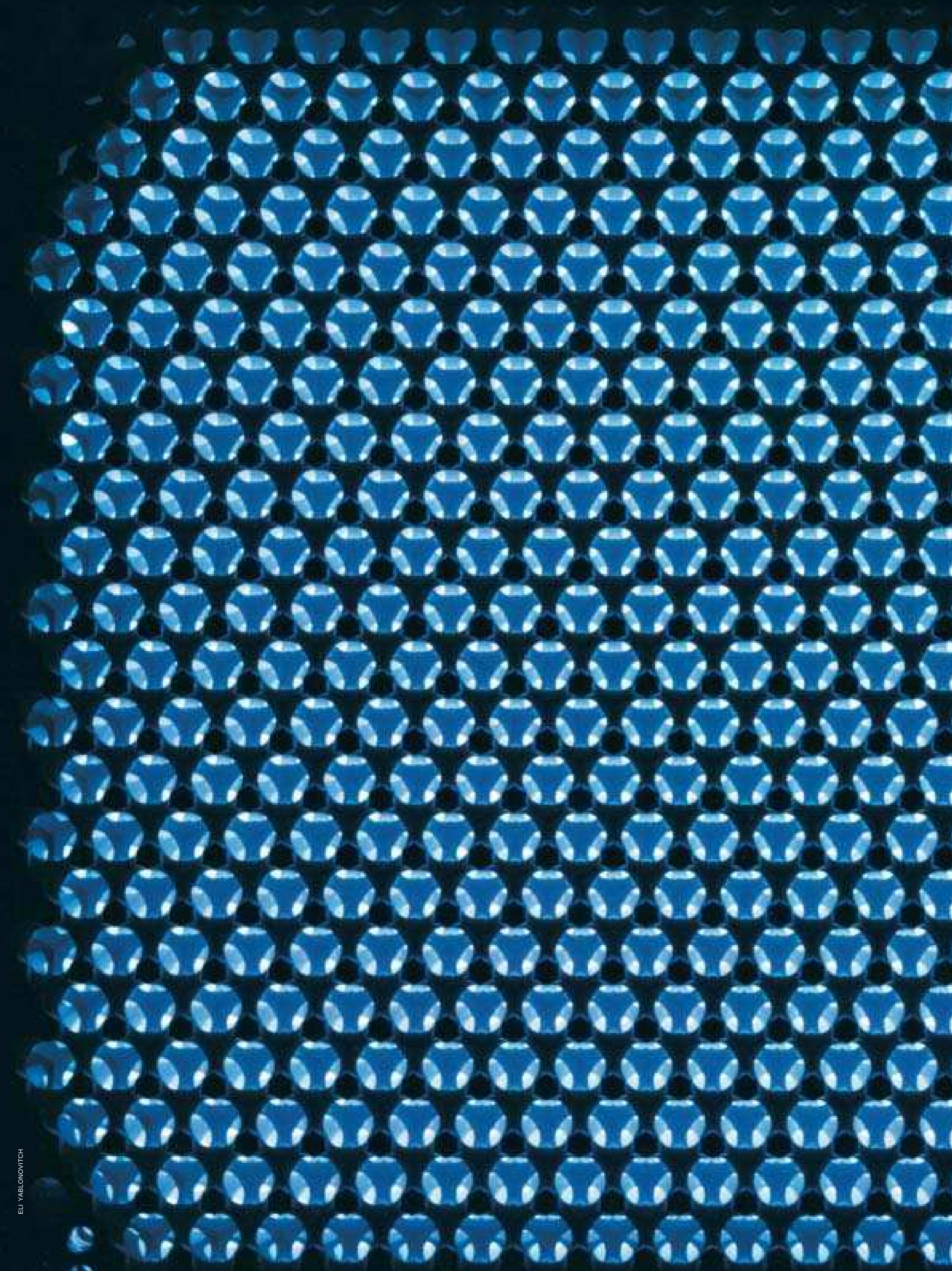

ALEXANDER MARSHACK

Musikinstrumente wie diese Knochenflöte sind mindestens 32 000 Jahre alt. Sie gehören zu den überzeugendsten Belegen für eine neue Sensibilität der ersten modernen Menschen.



__Ian Tattersall__ wurde in England geboren und wuchs in Ostafrika auf. Er ist Kustos der Abteilung für Anthropologie am Amerikanischen Museum in New York und hat mehrere Bücher über die Evolution des Menschen verfasst.

Der Artikel ist ein leicht gekürzter Auszug aus dem Buch „The Monkey in the Mirror“ von Ian Tattersall, das kürzlich bei Harcourt Inc. erschienen ist.



ELI YABLONOVITCH

PHOTONISCHE KRISTALLE

Halbleiter für Lichtstrahlen

Speziell strukturierte Materialien blockieren einen bestimmten Bereich von Lichtwellenlängen. Solche „optischen Halbleiter“ versprechen vielfältige Anwendungen für Glasfasern, winzige Laser und optoelektronische Schaltkreise.

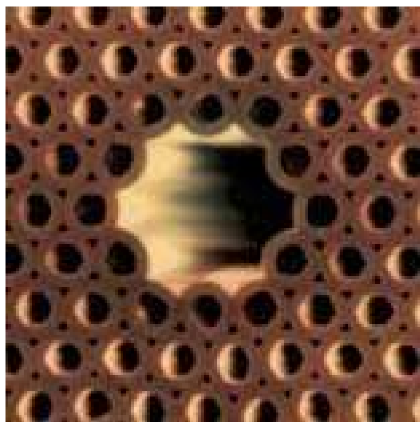
Von Eli Yablonovitch

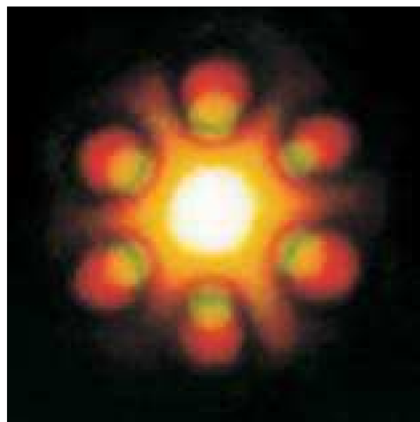
Das war nun schon der zweite entmutigende Telefonanruf: Noch eine Theoretikergruppe teilte mir mit, meine Entdeckung funktioniere nicht. Drei Jahre lang hatte ich unzählige Entwürfe ausprobiert, bis ich meinte, das Richtige gefunden zu haben. Aber wenn die Theoretiker Recht hatten, musste ich zurück ins Labor und weitersuchen. Oder vielleicht gab es das, was mir vorschwebte, gar nicht: eine künstliche Kristallstruktur, die Lichtstrahlen so manipuliert wie Halbleiter den elektrischen Strom.

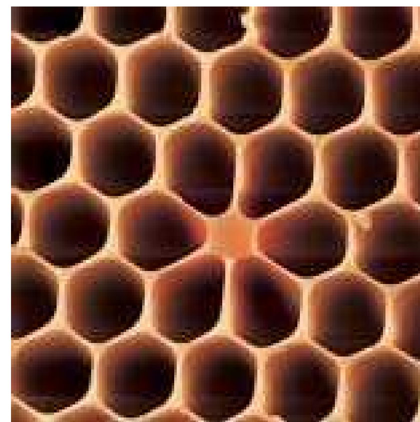
Elektronische Halbleiter sind bekanntlich als Herzstück von Computern und anderen Geräten im modernen Alltag allgegenwärtig. Halbleiter für Licht könnten die Umwälzungen in Telekommunikation und Informationstechnologie weiter vorantreiben – durch bessere Lichtwellenleiter, winzige Laser und integrierte photonische Schaltkreise, die vielleicht eines Tages die heute üblichen Mikrochips verdrängen werden.

In der Tat hat sich die Erforschung der photonischen Kristalle – nach schwierigen Anfängen in den achtziger Jahren und anfänglich großer Skepsis ▶

Dieser erste Prototyp eines optischen Halbleiters (Fachjargon: „photonischer Kristall“) entstand durch schräges Bohren von drei überlagerten Lochmustern in einen Keramikblock. Jedes Lochmuster ist um 35 Grad zur Senkrechten geneigt. Die Struktur heißt nach ihrem Erfinder Yablonovit. Das Muster aus jeweils sechs Millimeter großen Löchern blockiert Radiowellen zwischen 13 und 16 Gigahertz.







LINKS UND MITTE: MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON BLAZE PHOTONICS; RECHTS: CRYSTAL FIBRE A / S

Ein regelmäßiges Muster aus hunderten Röhrchen bildet einen photonischen Kristall, der Licht in dem Zentralkanal von etwa 15 Mikrometer Durchmesser gefangen hält (links). Die rechts abgebildete Struktur beschränkt das Licht auf den festen, zwei Mikrometer dicken Kern; diese Faser verhält sich optisch stark nicht-linear und könnte zum Schalten und Modulieren von Lichtpulsen dienen. Das Farbmuster (Mitte) illustriert, wie die Lichtbündelung in einer Bandlückenfaser von der Wellenlänge abhängt.

der Experten – als äußerst zukunftsträchtig erwiesen. Wie ich betreiben nun Wissenschaftler in aller Welt Firmen, die kommerzielle Anwendungen entwickeln. Die Skeptiker mussten einsehen, dass es möglich ist, für Licht die optische Entsprechung der so genannten Bandlücke in Halbleitern zu erzeugen.

Eine elektronische Bandlücke ist eine Art Sperrgebiet für Elektronen – ein schmaler Energiebereich, in dem sie sich nicht aufhalten dürfen. Falls die Elektronen im Halbleiter alle verfügbaren Energieniveaus unterhalb der Bandlücke auffüllen, kann kein Strom fließen, da kein Elektron einen freien Platz findet, an den es sich bewegen könnte – und ein Elektron über die Bandlücke zu heben, kostet eine Menge Energie. Doch falls ein paar überzählige Elektronen vorhanden sind, müssen sie automatisch Energien oberhalb der Bandlücke besetzen; dort können sie praktisch ungehemmt durch die weiten Räume unbesetzter Energieniveaus wandern. Umgekehrt ermöglicht auch ein Elektronendefizit unterhalb der Bandlücke das Fließen von Strom in Form positiv geladener „Löcher".

Halbleiter eignen sich deshalb so hervorragend für Schaltkreise und logische Funktionen, weil sich die Anzahl der Elektronen und Löcher ober- oder unterhalb der Bandlücke in weiten Grenzen variieren lässt. Das geschieht durch so genanntes Dotieren: Die Ingenieure beeinflussen die Dichte von Elektronen oder Löchern – und somit die Eigenschaften des Halbleiters –, indem sie unterschiedliche Fremdatome in den Halbleiterkristall einbringen.

Grundsätzlich entsteht eine Bandlücke mit ihren spezifischen Eigenschaften nur bei entsprechender Kristallstruktur – das heißt nur, wenn die Atome ein Gitter mit einer bestimmten Form und passenden Abständen bilden. In Siliziumkristallen und anderen Halbleitern liegen benachbarte Atome etwa ein viertel Nanometer (millionstel Millimeter) auseinander. Damit ein optisches Material eine photonische Bandlücke aufweist, muss es künstlich eine ähnliche, allerdings gröbere Gitterstruktur erhalten. Ein typisches Beispiel wären Blöcke aus speziellem Glas mit einem engen Muster feinster Bohrlöcher – jedes zylindrische Loch mit nur 400 Nanometern Durchmesser. Die Löcher entsprechen den Atomen im gewöhnlichen Halbleiter. In der Regel müssen die Lochabstände etwa so groß sein wie die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung, die manipuliert werden soll. Sichtbares Licht hat Wellenlängen von 400 bis 700 Nanometer; die meisten Mobiltelefone verwenden Wellen von rund 35 Zentimetern.

IN KÜRZE

➤ Photonische Kristalle sind Materialien, die künstlich mit regelmäßigen Strukturen im Mikrometer- und Nanometerbereich versehen werden und dadurch eine
➤ photonische Bandlücke aufweisen: Beim Durchgang von Licht wird ein bestimmter Wellenlängenbereich vollständig abgeblockt. Solche Materialien verhalten sich dadurch für Licht wie herkömmliche Halbleiter, die eine elektronische Bandlücke – einen für Elektronen „verbotenen" Energiebereich – besitzen.
➤ Licht-Halbleiter versprechen interessante Anwendungen für die optische Datenübertragung und für künftige Schaltkreise, die Licht und Strom kombinieren.

Lücke durch Löcher

Das in das löcherige Material eindringende Licht wird an den abertausend Grenzflächen zwischen Luft und Glas gebrochen und teilweise reflektiert. Dadurch entsteht ein komplexes Muster von Lichtstrahlen, die einander überlagern und – je nach Wellenlänge, Ausbreitungsrichtung im Kristall, Brechungsindex des Glases und Lochmuster – verstärken oder auslöschen. Bei kompletter Auslöschung eines schmalen Wellenlängenbereichs in allen Richtungen entspricht dieses „Band" von Wellenlängen der Bandlücke für Elektronen in einem Halbleiter: Der Kristall ist für dieses Wellenlängenband undurchlässig. Wird die Struktur der photonischen Bandlücke verändert – beispielsweise durch Füllen einiger Löcher –, so entstehen andere Effekte, ähnlich wie beim Dotieren elektronischer Halbleiter. Oft stellt man photonische Kristalle aus Halbleitermaterial her; dadurch bekommt der Kristall zur elektronischen zusätzlich eine optische Bandlücke.

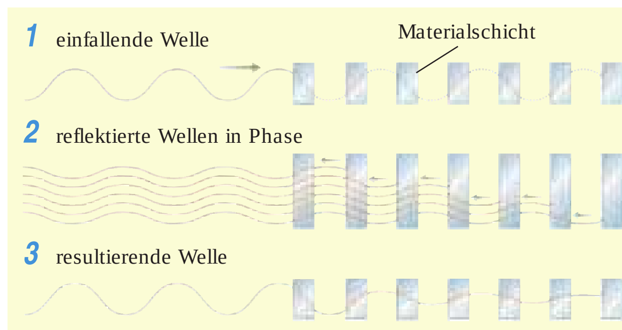
Die Suche nach optischen Halbleitern begann 1987 ziemlich unspektakulär damit, dass Sajeev John, damals an der Universität Princeton, und ich, damals bei Bell Communications Research in New Jersey, einander kennen lernten. Ich versuchte gerade, den Wirkungsgrad von Telekommunikations-Lasern zu steigern. Deren Stromverbrauch wurde größten- ▶

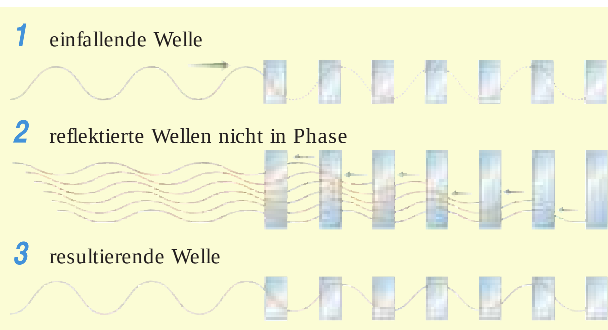
Eins zwei drei: Bandlücken in allen Dimensionen

Eindimensional

Wenn die Wellenlänge innerhalb der Bandlücke liegt: Die einfallende Welle (*1*) wird von jeder Schicht des photonischen Kristalls partiell reflektiert; die reflektierten Teilwellen schwingen in Phase und verstärken einander (*2*). Sie überlagern sich mit der einfallenden Welle zu einer stehenden Welle (*3*), die sich nicht durch den Kristall fortbewegt.

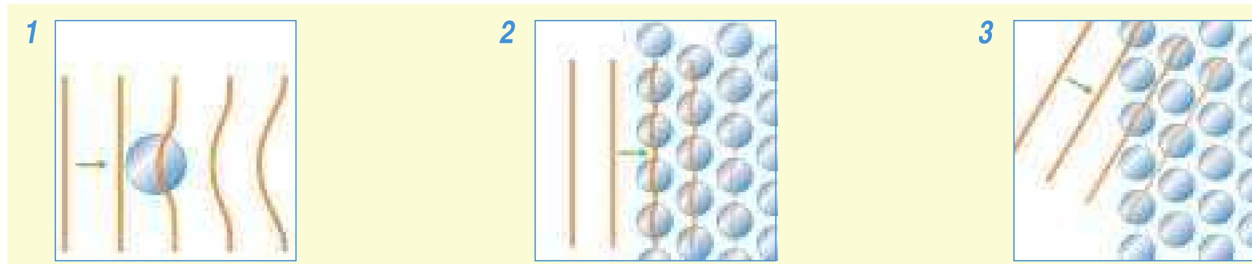
Wenn die Wellenlänge nicht innerhalb der Bandlücke liegt: Die einfallende Welle (*1*) erzeugt reflektierte Teilwellen, die nicht phasengleich sind und einander schwächen (*2*). Das Licht pflanzt sich insgesamt (*3*) nur leicht abgeschwächt durch den Kristall fort.





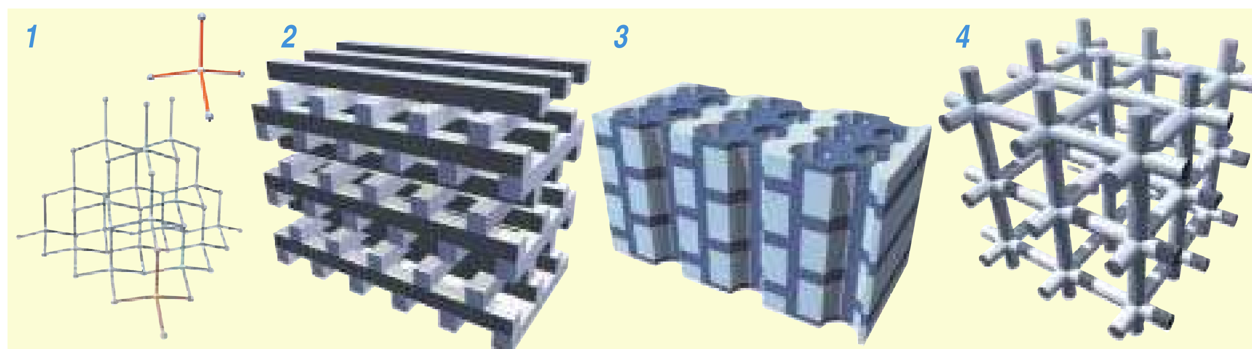
Zweidimensional

Eine komplette zweidimensionale Bandlücke entsteht nur dann, wenn die von jeder einzelnen Elementarzelle (blaue Kugel) reflektierten und gebrochenen Wellen (Letztere durch rote Wellenfronten angedeutet) in ihrer Summe die einfallende Lichtwelle auslöschen (*2*) – und zwar unabhängig von der Einfallsrichtung (*3*). Für eine komplette dreidimensionale Bandlücke gilt das Entsprechende in sämtlichen Raumrichtungen.



Dreidimensional

Das tetraedrische Gitter von Diamant (*1*) ist für ein dreidimensionales Bandlückenmaterial am besten geeignet. Dieses Gitter verbirgt sich auch im Yablonovit (siehe Seite 66/67), im „Bretterstapel“ (*2*) und in einem komplexen Röhrenmuster (*3*) aus Siliziumdioxid (hell) und Silizium (dunkel). Die Gerüststruktur (*4*) ist eines der wenigen Beispiele für eine andere Gittersymmetrie – allerdings mit kleiner Bandlücke.



SLIM FILMS

teils für spontane Lichtemission verschwendet, und die photonische Bandlücke versprach Abhilfe: Wenn die Atome zu einem Material gehören, das Licht einer bestimmten Wellenlänge nicht durchlässt, können sie dieses Licht auch nicht spontan emittieren.

John hingegen trieb reine Grundlagenforschung. Er wollte mit der photonischen Bandlücke die so genannte Licht-Lokalisierung zu Wege bringen. In der Elektronik heißt der entsprechende Effekt Elektronen-Lokalisierung und ist ein Quantenphänomen in amorphen Halbleitern: Die ungeordnete Struktur des Materials stoppt – „lokalisiert" – Elektronen an festen Orten und unterbricht dadurch den Stromfluss.

John und ich einigten uns rasch auf die Terminologie „photonische Bandlücke" und „photonischer Kristall". Ich kehrte wohlgemut in mein Labor zurück und glaubte, in wenigen Monaten ein funktionierendes Modell schaffen zu können.

Da das Prinzip der Bandlücke für elektromagnetische Strahlung jeder Wellenlänge gilt, wollte ich zunächst Strukturmodelle mit relativ großem Gitterabstand produzieren und sie dann mit der dazu passenden elektromagnetischen Wellenlänge testen. Also ging ich in eine Werkstatt und erzeugte mit einem Bohrer regelmäßige Muster in Platten aus dielektrischem, das heißt elektrisch isolierendem Material. Die Struktur dieses künstlichen „Kristalls" stand mir völlig frei – die Frage war nur: Welche Struktur verursacht eine photonische Bandlücke?

Bei elektronischen Halbleiterkristallen entsteht die Bandlücke, weil die Elektronen sich quantenmechanisch betrachtet wie eine Welle verhalten, die an den Atomen einer Gitterreihe oder Kristallschicht gestreut wird. Ein Teil der Welle wird rückwärts gestreut, und wenn die Wellenlänge ungefähr dem Abstand der Kristallschichten entspricht, überlagern sich die rückgestreuten Wellen kohärent und verstärken einander. Im Ergebnis wird die Elektronenwelle komplett reflektiert – wie Licht von einem Spiegel. Damit man von einer echten Bandlücke sprechen kann, muss diese Reflexion über einen gewissen Wellenlängenbereich auftreten – und für beliebige Fortpflanzungsrichtung im Kristall.

Diamant als Überraschungsgeschenk

Eine elektromagnetische Bandlücke lässt sich nicht durch einfaches Nachahmen eines Siliziumkristalls herstellen, so viel schien mir klar. Das Licht wird an Grenzflächen – zum Beispiel zwischen Glas und Luft – durch den unterschiedlichen Brechungsindex gestreut. Eine so starke Wechselwirkung wie die zwischen Elektronen und Siliziumatomen würde ein Material mit enormem Brechungsindex erfordern.

Auch kann die passende Struktur nicht einfach theoretisch hergeleitet werden, denn die Bandlücke entsteht durch das komplizierte Zusammenwirken von vielen hundert Löchern. Für Halbleiter hatten die Theoretiker zwar Computermodelle entwickelt, doch auf Photonen waren sie nicht anwendbar. Erstens sind die Bewegungsgleichungen verschieden: Für Elektronen gilt die Schrödinger-Gleichung, während Photonen den Maxwell'schen Gleichungen gehorchen. Zweitens lässt sich bei Photonen die Polarisation nicht so einfach vernachlässigen wie bei Elektronen. Darum hatte ich keine Möglichkeit, von vornherein festzustellen, ob eine bestimmte Struktur eine photonische Bandlücke haben würde. Also kreierten meine Mitarbeiter und ich eine Struktur nach der anderen und probierten sie aus. Im Laufe von vier Jahren bohrte mein treuer Maschinist John Gural – allerdings mit Hilfe einer numerisch gesteuerten Bohrmaschine – mehr als 500 000 Löcher in dielektrische Platten. Doch es war wie verhext: Wir produzierten nichts als Fehlschläge.

Wir hielten die kubisch-flächenzentrierte Struktur für besonders aussichtsreich. Sie entsteht beispielsweise, indem man ein Schachbrett nimmt und auf jedes weiße Feld einen schwarzen Würfel platziert sowie auf jedes schwarze Feld einen weißen. Darauf baut man nach dem gleichen Prinzip eine zweite Schicht – schwarze Würfel auf weiße und umgekehrt – und so weiter aufwärts. Insgesamt bilden dann die schwarzen Würfel ein kubisch-flächenzentriertes Gitter, und ebenso, unabhängig davon, die weißen.

Diese Struktur erlaubt unzählige Variationsmöglichkeiten, denn man kann

Anwendungen für photonische Kristalle

Zweck	Beschreibung	Stand der Technik
Lichtwellenleiter	Material mit zweidimensionaler Bandlücke wird in die dritte Dimension erweitert	Erste Entwicklungen bereits im Handel
Nanoskopische Laser	Die kleinsten Laser der Welt entstehen in einer Dünnschicht mit zweidimensionaler Bandlücke	Im Laborstadium
Ultraweißes Farbpigment	Unvollständige dreidimensionale Bandlücke in Material mit Kristallstruktur wie Opal	Im Laborstadium, kostengünstige Herstellung in Erprobung
Radioantennen und -reflektoren	Verwenden mikroskopische Schwingungskreise statt normale dielektrische Materialien	Im Laborstadium für Kernspintomographie und Antennen
Leuchtdioden	Strukturen mit photonischen Bandlücken sind Lichtumwandler mit hohem Wirkungsgrad (mehr als fünfzig Prozent)	Im Laborstadium, muss sich auf dem Markt gegen konkurrierende Methoden durchsetzen
Photonische integrierte Schaltkreise	Zweidimensionale Dünnschichten lassen sich wie herkömmliche Chips herstellen, um Kanalfilter, Modulatoren, Kopplungsschaltungen usw. zu erzeugen	In Entwicklung







LINKS: PAUL BEARD; MITTE: HELEN GHIRADELLA, AUS: FROM THE ANNALS OF THE ENTOMOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA, BD. 78, 1985; RECHTS: THE PURCELL TEAM, CORBIS

Auch in der Natur kommen photonische Bandlücken vor, etwa in den Flügeln einiger Schmetterlinge (links) und in Opal (rechts). In beiden Fällen ist die Lücke unvollständig – sie wirkt nicht in jeder Einfallsrichtung – und ruft schillernde Farben hervor. Unter dem Elektronenmikroskop offenbart das Bruchstück einer grün irisierenden Schmetterlingsschuppe (Mitte) eine kubisch-flächenzentrierte Struktur im Submikrometerbereich. Opale bestehen aus ähnlich winzigen Silikatkügelchen, die ebenfalls kubisch-flächenzentriert angeordnet sind.

die schwarzen Würfel durch andere geometrische Formen ersetzen, wodurch die Lichtbrechung und Reflexion verändert wird. Nach zwei Jahren glaubten wir etwas Passendes gefunden zu haben: eine kubisch-flächenzentrierte Struktur, in der jeder schwarze Würfel durch eine Hohlkugel im Material ersetzt war. Ich veröffentlichte dieses Ergebnis, doch es war falsch.

Denn unterdessen waren auch die Theoretiker vorangekommen. Einige hatten ihre Bandlücken-Computerprogramme auf Licht umgestellt. Mehrere Gruppen, unter anderem die von K. Ming Leung an der Polytechnic University in New York und Kai Ming Ho an der Iowa State University, teilten mir telefonisch mit, dass ich mich irrte. Meine mühsam gefundene Struktur erzeugte nur eine Pseudolücke mit Bandbreite null – das heißt, nur eine einzige Wellenlänge wurde dadurch verboten. Trotz unserer jahrelangen Bemühungen schien die Natur keine photonische Bandlücke zuzulassen. Vielleicht war ein Brechungsindex nötig, der weit über dem aller bekannten transparenten Materialien lag.

Doch nach wenigen Wochen fand die Iowa-State-Gruppe heraus, dass die Kristallstruktur von Diamant – das tetraedrische Gitter – eine Bandlücke bewirken kann. Die Struktur mit der größten Bandlücke besteht aus dielektrischen Stäbchen in Richtung der chemischen Bindungen zwischen den Kohlenstoffatomen, wobei die Atome selbst zu geometrischen Punkten zusammenschrumpfen. Diamant als solcher erzeugt unseres Wissens keine photonische Bandlücke. Zu Beginn unserer Forschungen hatten wir angenommen, einfaches Nachahmen der Kristallstruktur von Silizium würde niemals eine photonische Bandlücke liefern. Welch ein Irrtum: Silizium hat die gleiche Kristallstruktur wie Diamant.

Die tetraedrische Diamantstruktur hat viele Erscheinungsformen – je nach Gestalt der Zwischenräume und Beobachtungswinkel. Der Kasten auf Seite 69) zeigt zwei höchst unterschiedliche photonische Kristalle mit Diamantstruktur. Meine Gruppe schuf 1991 den ersten echten photonischen Kristall namens Yablonovit aus einer Variante der Diamantstruktur. Die Natur erwies sich nun doch als gnädig: Schon bei einem Brechungsindex von nur 1,87 entsteht im Diamantgitter eine Bandlücke – und es gibt viele optische Materialien mit Werten bis zu 3,6.

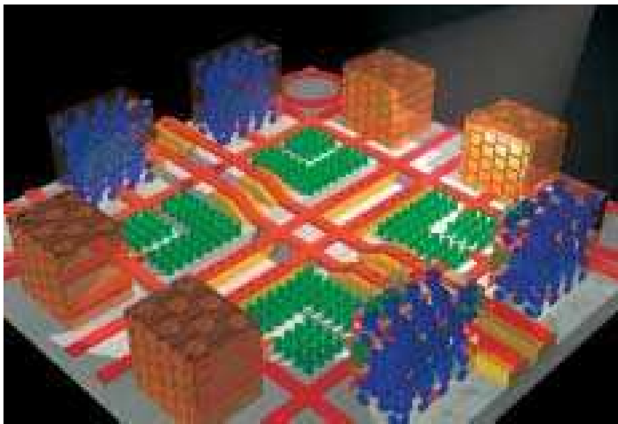
Mikrochips und Schmetterlinge

Diese Struktur sollte nicht die einzige mit photonischer Bandlücke bleiben. Der Theoretiker Joseph W. Haus, damals am Rensselaer Polytechnic Institute in Troy (US-Bundesstaat New York), wies 1992 nach, dass wir die kubisch-flächenzentrierte Struktur allzu rasch aufgegeben hatten. Die Wissenschaftler hatten nur Wellenlängenbereiche untersucht, die etwa dem Doppelten einer Elementarzelle entsprachen – vergleichbar der Grundschwingung einer Gitarrensaite. In diesem Bereich gibt es aber, wie erwähnt, nur eine Pseudolücke. Haus untersuchte aber auch eine höhere Frequenz, bei der eine ganze Wellenlänge in eine Elementarzelle passt – sozusagen die erste Oberschwingung der Gitarrensaite –, und zeigte, dass in diesem Bereich eine echte Bandlücke entstehen kann. Außerdem entdeckte er, dass selbst ein einfach kubisches Gitter – ein Gerüst aus gleich langen Stäben – eine kleine Bandlücke aufweisen kann.

Mittlerweile wissen wir, dass es auch in der Natur photonische Kristalle gibt: etwa den glitzernden Edelstein Opal, den schillernden Belag von Schmetterlingsflügeln oder die Borsten eines Meereswurms namens Seemaus. Sie alle weisen eine photonische Bandstruktur auf, allerdings keine komplette Lücke: In manchen Richtungen sind sie lichtdurchlässig, in anderen nicht. Eine vollständige Bandlücke ist der Natur nicht geglückt, vielleicht weil der dafür erforderliche Unterschied der Brechungsindizes zu groß ist.

Doch auch eine unvollständige Bandlücke kann nützlich sein. Zum Beispiel gelingt es mittlerweile, mikroskopische Partikel aus Titandioxid durch Selbstorganisation in eine Opalstruktur einzulagern. Titandioxid dient als intensiv weißes Pigment in Farben und Papier; die durch die Bandlückenstruktur verursachte kohärente Lichtstreuung verstärkt das Weiß und spart Titandioxid. Eines Tages könnten photonische Kristalle in Wandfarben und Papier zum Alltag gehören.

Eine andere nützliche Anwendung sind zweidimensionale photonische Kristalle zum Blockieren der Lichtausbreitung in einer Ebene. Werden solche Strukturen in die dritte Dimension verlängert, entsteht eine neue Art optischer Fasern. Herkömmliche Glasfasern haben einen Kern mit hohem Brechungsindex und führen das Licht durch innere Totalreflexion. 1999 konstruierte Philip St. J. ▶


JOHN D. JOANNOPOULOS / MIT

Dieser „photonische Chip", der verschiedene optische Kristalle miteinander verbindet, ist noch Zukunftsmusik.

Russell von der Universität Bath (England) photonische Bandlücken-Fasern. Bei einer Variante wandert das Licht durch ein zentrales Loch, in dem es durch die zweidimensionale Bandlücke des umgebenden Materials gefangen bleibt. Da sich durch einen Hohlraum mehr optische Leistung transportieren lässt als durch Glas, steigt der Informationsdurchsatz gegenüber herkömmlichen Glasfasern um das Hundertfache. Firmen in Dänemark und Großbritannien haben solche Spezialfasern bereits bis zur Marktreife entwickelt.

Zweidimensionale Bandlückenstrukturen können auch als photonische Dünnschichtkristalle realisiert werden, wie Shanhui Fan und John D. Joannopoulos 1997 am Massachusetts Institute of Technology vorrechneten. Solche Gebilde sind mit den Standardverfahren für integrierte Schaltkreise leicht herzustellen. Analog zum Dotieren elektronischer Halbleiter können Störstellen in photonische Kristalle eingebaut werden – zum Beispiel das Loch im Zentrum photonischer Wellenleiter. Umgekehrt entsteht durch Verstopfen eines der Löcher in einem Dünnschichtkristall ein kleiner optischer Hohlraum, der eine elektromagnetische Eigenschwingung festzuhalten vermag – ähnlich einer zwischen zwei Spiegeln gefangenen Lichtwelle – und sich darum für winzige Laser eignet. Erst kürzlich baute Axel Scherer am California Institute of Technology mit diesen winzigen optischen Hohlräumen die kleinsten Laser, die es je gab: Ihr Volumen beträgt nur 0,03 Kubikmikrometer (milliardstel Kubikmillimeter).

Optische Schaltkreise aus entsprechend präparierten photonischen Dünnschichtkristallen wären das Nonplusultra der optoelektronischen Miniaturisierung. Viele Forscher glauben, dass integrierte Schaltkreise, die herkömmliche Elektronik mit Photonik kombinieren, schon bald die Verarbeitung optischer Daten revolutionieren könnten. Vermutlich wird dieses Anwendungsgebiet in nächster Zeit im Zentrum der wissenschaftlichen Aufmerksamkeit stehen, obwohl es bis zur Marktreife wohl noch Jahre dauert.

Für den Radiowellenbereich würde man auf den ersten Blick von einem Bandlückenkristall überhaupt keinen Nutzen erwarten, weil er einfach viel zu groß sein müsste. Die meisten Mobiltelefone verwenden Wellen von rund 35 Zentimeter Länge, und ein Kristall, der zahlreiche Löcher oder Stäbe in solchen Abständen enthält, wäre buchstäblich nicht tragbar. Einen Ausweg bieten hier die gewöhnlichen elektrischen Schwingkreise, die eine Spule mit einem Kondensator verbinden. Eine solche Schaltung vermag eine elektromagnetische Welle in ein kleines Volumen zu packen. Eine regelmäßige Anordnung von Schwingkreisen kann sich wie ein photonischer Kristall verhalten und Wellen steuern, deren Wellenlänge viel größer ist als alle Schwingkreise zusammen.

Sheldon Schultz und David R. Smith von der Universität von Kalifornien in San Diego nutzten Gruppen solcher Schwingkreise, um so genannte linkshändige Materialien zu konstruieren, die im Mikrowellenbereich einen negativen Brechungsindex haben. In solchen Materialien gehen elektromagnetische Wellen quasi rückwärts: Wenn sich die Wellenberge von links nach rechts bewegen, wandert die Energie der Welle von rechts nach links. Von „linkshändig" spricht man, weil die Richtungen des elektrischen Feldes, des Magnetfeldes und der Energieausbreitung nicht mehr der gewohnten Rechte-Hand-Regel folgen, die man sich durch rechtwinkliges Abspreizen von Daumen, Zeige- und Mittelfinger der rechten Hand vergegenwärtigt.

John B. Pendry vom Imperial College in London hat solche Bandlückengeräte aus zahlreichen elektromagnetischen Schwingungskreisen benutzt, um im Radiofrequenzbereich oszillierende Magnetfelder zu manipulieren, wie sie in der medizinischen Kernspintomografie verwendet werden. Forscher aus Militär, Wirtschaft und Hochschulen untersuchen, wie Schwingkreis-Anordnungen zur Steuerung von Radiowellen eingesetzt werden können. Man verspricht sich davon präzisere GPS-Antennen, indem die Reflexion der Signale des Global Positioning System an der Erdoberfläche unterdrückt wird, sowie bessere Mobiltelefone durch Reduzieren der elektromagnetischen Kopplung mit dem Kopf des Benutzers.

Wahrscheinlich lässt sich das Prinzip dieser Schwingkreise auf die viel kürzeren optischen Wellenlängen übertragen. Dafür könnten so genannte Plasmonen genutzt werden – die Quanten kleiner Ströme, die an metallischen Oberflächen im optischen und ultravioletten Frequenzbereich oszillieren. Solche winzigen Anordnungen von Schwingkreisen wären kleiner als eine optische Wellenlänge und würden die Miniaturisierung photonischer Kristalle auf die Spitze treiben.

Wenn ein Forscher etwas Neues entdecken will, muss er gelegentlich übertrieben zuversichtlich sein, sonst beginnt er die Entdeckungsreise erst gar nicht oder kehrt auf halbem Weg um. Angesichts der heutigen Projektvielfalt auf unserem Gebiet bin ich froh, dass ich seinerzeit die enttäuschenden Telefonanrufe als Ansporn zu weiteren Forschungen verstand. ■

Literaturhinweise

Photonische Kristalle durch Selbstorganisation. Von Ulrich Wolf. Spektrum der Wissenschaft, Mai 1999, S. 26.

Optical Properties of Photonic Crystals. Von Kazuaki Sakoda. Springer Series in Optical Sciences, Bd. 80. Springer, Heidelberg 2001.

Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Von John D. Joannopoulos, Robert D. Meade und Joshua N. Winn. Princeton University Press, 1995.

Weblinks bei **www.spektrum.de** *unter „Aktuelles Heft".*



Eli Yablonovitch *gehört zu den Pionieren auf dem Gebiet photonischer Bandlücken; er schuf bei Bell Communications Research in New Jersey den ersten photonischen Kristall. 1992 wechselte er zur Abteilung für Elektrotechnik an der Universität von Kalifornien in Los Angeles, wo er die Optoelektronik-Gruppe leitet. Er gründete zwei Privatfirmen – Ethertronics und Luxtera – für photonische Kristalle.*

ENERGIEPOLITIK

Die Himba und der

Die Kultur eines namibischen Stammesvolkes droht in einem Stausee unterzugehen. Dies sei eben der Preis des Fortschritts, behaupten die Befürworter des Großdamms.



FOTOS: KARIN RETIEF

große Damm

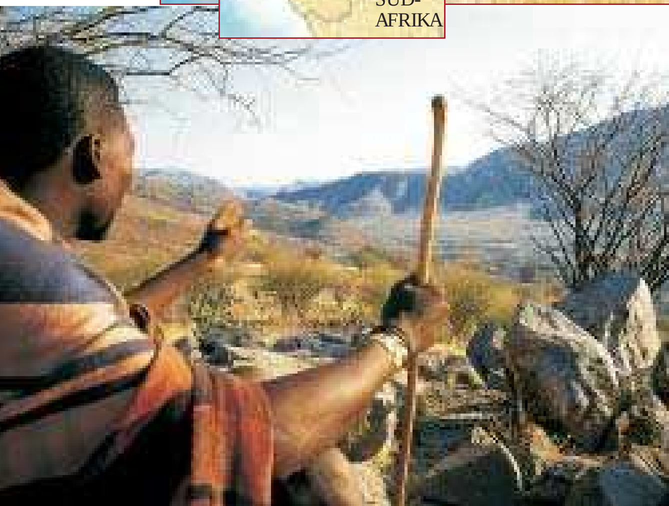
Jakatunga Tjiuma, Berater eines Himba-Häuptlings, ist besorgt: Das geplante Wasserkraftwerk am Kunene kann seinem Volk die Lebensgrundlage rauben.

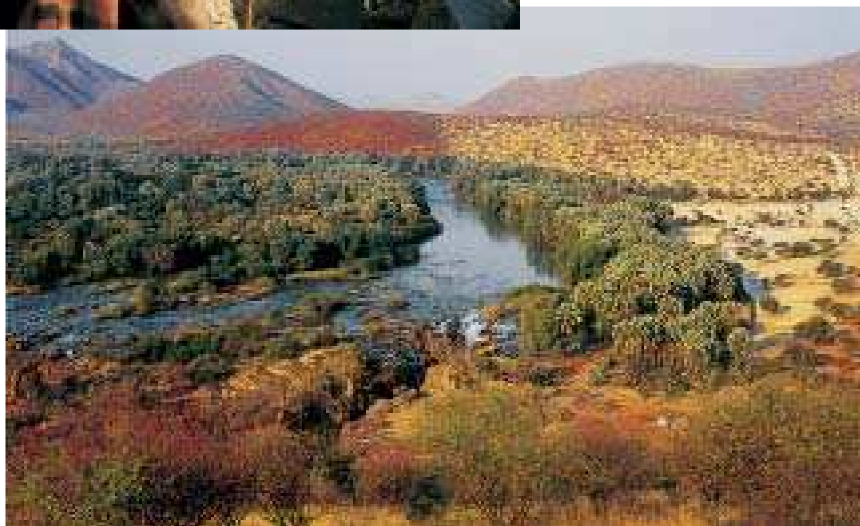
Von Carol Ezzell

Die Wasser des Kunene bilden Namibias Nordwestgrenze zu Angola. Der Fluss durchzieht ein karges, trockenes Bergland, das gleichwohl Heimat ist für einen der letzten weit gehend autark lebenden Stämme Afrikas, für die Himba. In diesem Land, das sie nach einem mythischen Vorfahren Kaoko nennen, errichten diese Halbnomaden ihre Dörfer und lassen ihre Rinder weiden. Dort liegen ihre Vorfahren begraben, und die heiligen Gräber vermitteln kulturelle Identität und Kontinuität. Doch geht es nach dem Willen der Regierung in Windhoek, wird im Kaoko-Land ein gewaltiger Damm entstehen, um Namibias Energiehunger zu stillen. Fast 400 Quadratkilometer Land würden ihm zum Opfer fallen. Gegen den erklärten Willen der Himba.

Etwa 16000 Menschen umfassen die Sippen dieses Hirtenvolks. Im kargen Bergland leben sie von dem Fleisch und der Milch ihrer Rinder und Ziegen, dazu gibt es hin und wieder Kürbis oder Melone. Man nennt die Himba manchmal auch das rote Volk, weil sie traditionell Körper, Haar und die aus Tierhäuten gefertigte Kleidung mit einer Mischung aus Butterfett und gestoßenem roten Ocker einreiben. Nach eigenem Bekunden tun sie dies um der Schönheit willen, doch zweifellos schützt die Paste auch vor Sonne und Austrocknung.





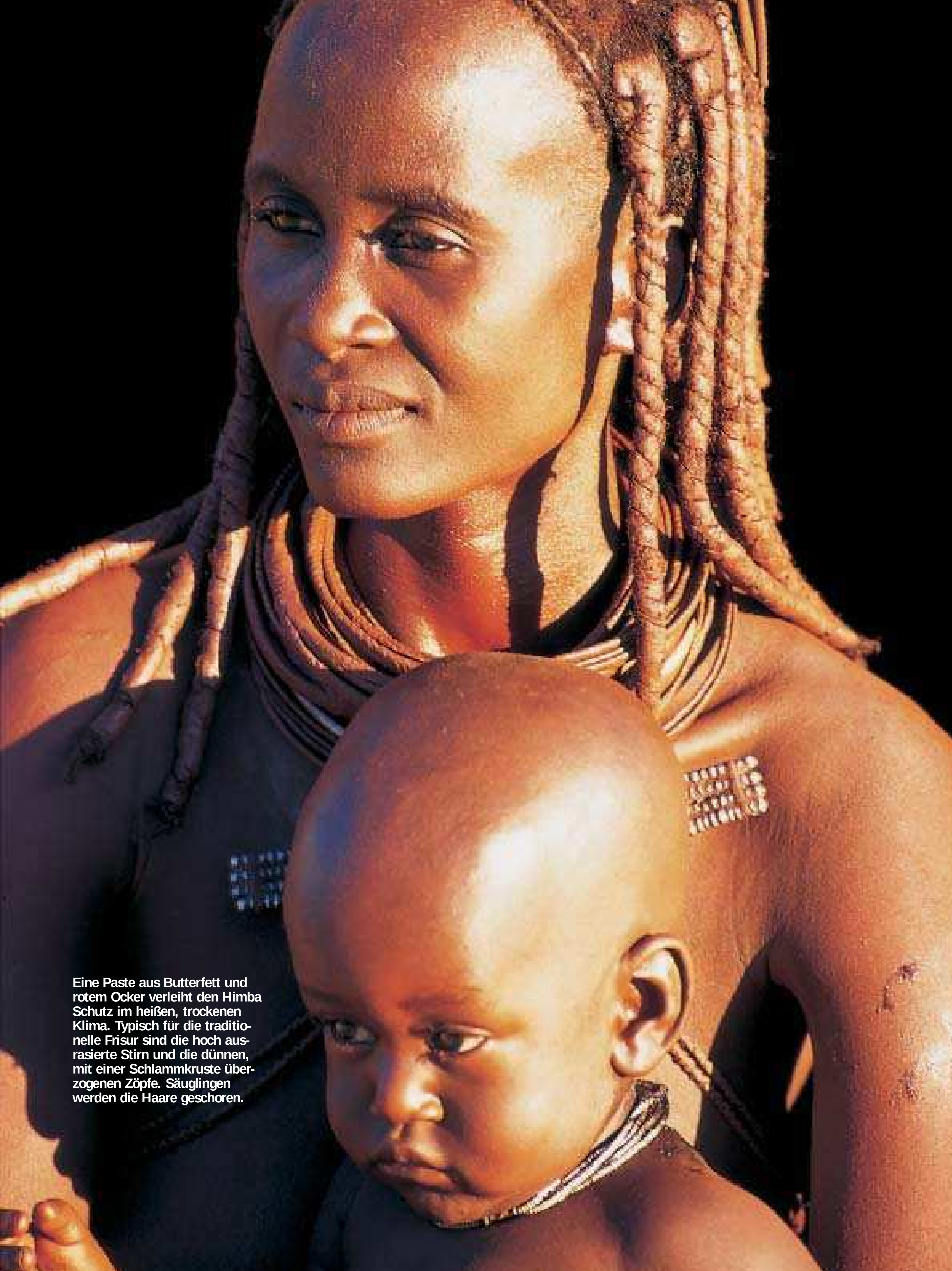


Der Kunene bildet Namibias Nordwestgrenze zu Angola; hier liegt die Heimat der Himba im trockenen Bergland des Kaoko-Lands. Das mittlere Bild zeigt im Hintergrund den von der namibischen Regierung favorisierten Standort für den geplanten Staudamm (Standort 1 in der Karte). Die Regierung Angolas bevorzugt einen weiter flussabwärts in den Baynes Mountains gelegenen Standort (unteres Foto, Standort 2 in der Karte).

Seit vielen Jahrzehnten leben diese Menschen weit gehend isoliert – kein anderer Stamm machte ihnen das öde Land streitig. Auch die deutschen Kolonisatoren, die Ende des 19. Jahrhunderts „ihr Deutsch-Südwestafrika" gründeten, hielten sich fern. Die Lage änderte sich erst in neuerer Zeit: Unter südafrikanischem Protektorat wurde ihr Umherziehen eingeschränkt, was viele Himba entwurzelte und ins soziale Abseits trieb.

Mit ihrer Isolation könnte es bald vorbei sein. Ein Standort unterhalb der Epupa-Wasserfälle erscheint viel versprechend für den Bau eines Damms. Erste Pläne für einen Staudamm an dieser Stelle gab es schon 1969, als das ehemalige Deutsch-Südwestafrika noch der Verwaltung Südafrikas unterstellt war. Die Idee verschwand in der Versenkung, bis Namibia im Jahr 1990 seine Unabhängigkeit erlangte. Ein Jahr später gaben die beiden Nachbarländer Namibia und Angola eine Machbarkeitsstudie in Auftrag, die zwei mögliche Standorte für einen Staudamm unter die Lupe nahm: die Epupa-Fälle und eine weiter flussabwärts gelegene Stelle in den Baynes Mountains. Die Studie kam zu dem Ergebnis, Epupa sei die wirtschaftlich sinnvollere Alternative, doch Angola hält am zweiten Standort fest. Zum Teil wohl deswegen, weil das Land dann auch mit Geldern für die Sanierung eines im Bürgerkrieg zerstörten Staudammes an einem angolanischen Nebenfluss des Kunene rechnen könnte. Das macht dieses Projekt dann aber auch teurer im Vergleich zu dem namibischen.

Bis zum Jahr 2008 soll deshalb nach dem Willen der namibischen Regierung an den Epupa-Fällen ein provisorisches Dorf für mehr als tausend Arbeiter entstehen. Die Häuptlinge der Himba sehen dem mit gemischten Gefühlen entgegen, denn sie fürchten soziale Probleme wie Alkohol, Prostitution und Aids. Die Verheißungen des Fortschritts – bessere Straßen, bessere Gesundheitsversorgung, Schulen und elektrischer Strom – bedeuten ihnen dagegen nur wenig. Ihre Sorgen sind nicht unbegründet. Die Weltstaudammkommission konstatierte im ▶



Eine Paste aus Butterfett und rotem Ocker verleiht den Himba Schutz im heißen, trockenen Klima. Typisch für die traditionelle Frisur sind die hoch ausrasierte Stirn und die dünnen, mit einer Schlammkruste überzogenen Zöpfe. Säuglingen werden die Haare geschoren.

November 2000, dass weltweit vierzig bis sechzig Millionen Menschen durch den Bau großer Dämme ihre Heimat verloren haben. Gerade die einheimische Urbevölkerung hatte dem Bericht zufolge unter den negativen Konsequenzen solcher Vorhaben stets besonders zu leiden, ohne von ihrem Nutzen sonderlich zu profitieren. Welchen Wert soll man dem Recht eingeborener Völker auf ungestörte Ausübung ihrer überlieferten Lebensweise zumessen, welchen der schieren Notwendigkeit für Entwicklungsländer, ihre natürlichen Energieressourcen zu erschließen?





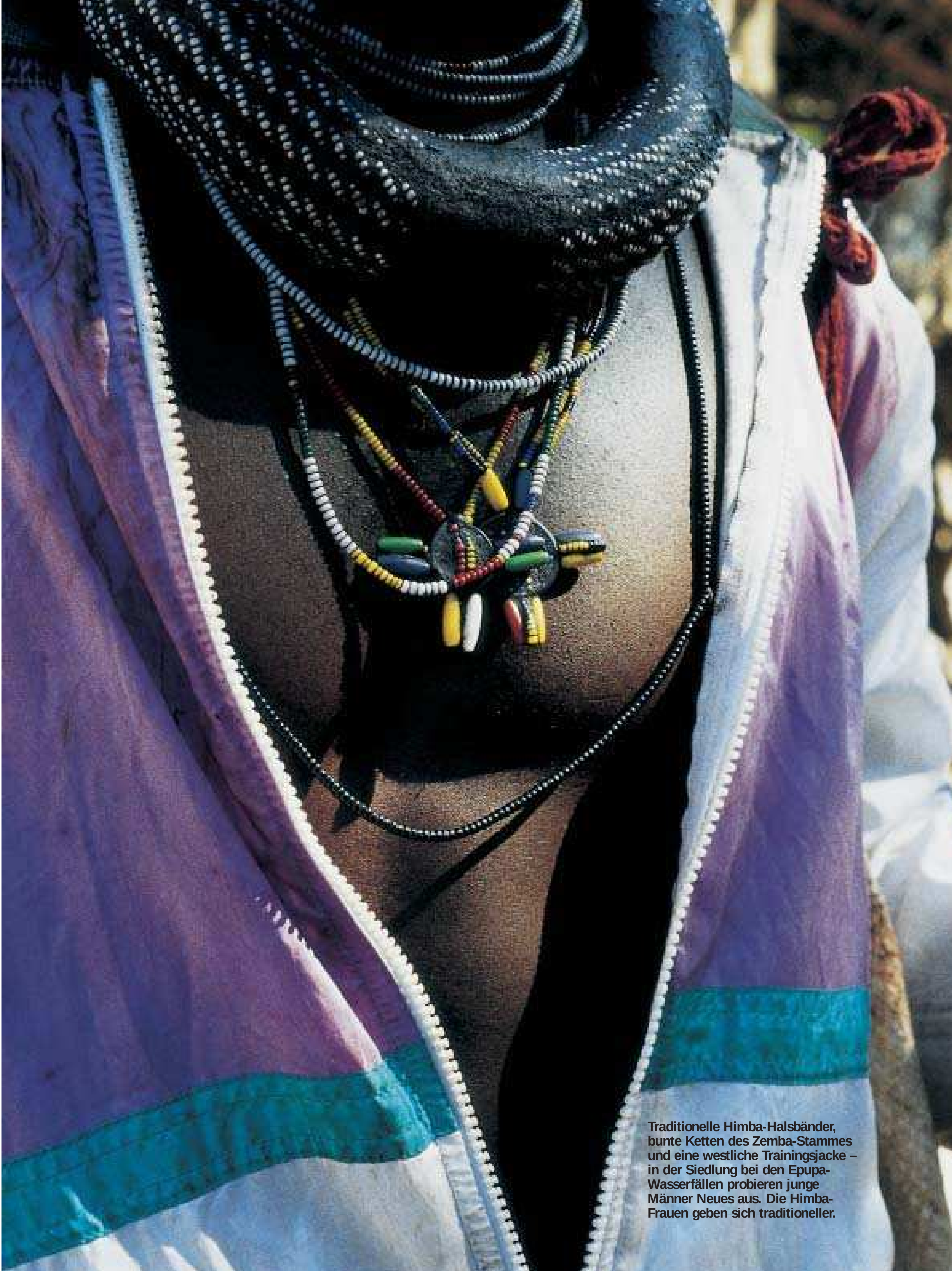
In einem traditionellen Kral (Runddorf) sitzen Frauen und Kinder frühmorgens am Feuer (oben), um sich nach der kühlen Wüstennacht aufzuwärmen. Als Zeichen, dass sie verheiratet sind, tragen die Frauen die Erembe auf dem Kopf, eine kunstvoll gefältelte Kopfbedeckung aus Kaninchenleder. Jungen hüten am Tage die Herde ihrer Familie (Mitte). Viehbesitz symbolisiert für die Himba Wohlstand; wenn ein reicher Mann stirbt, schlachtet seine Familie Dutzende von Rindern und schmückt sein Grab mit den Schädeln der Tiere (unten), um den Status des Verstorbenen zu bekunden. Grabstätten gelten als heilige Orte – etwa 160 würden im Stausee versinken.



Ich hatte Gelegenheit, mit Hikuminwe Kapika, einem von etwa einem Dutzend Himba-Häuptlingen, zu sprechen. Das bedeutete allerdings eine Reise ans Ende der Welt. Erst zwei Tage nach dem Verlassen der letzten geteerten Straße erreichte unser allradgetriebener Pick-up-Truck die vierzig Meter hohen Epupa-Wasserfälle. An Bord hatten wir Benzinkanister (die nächste Zapfsäule ist eine halbe Tagesfahrt entfernt), Trinkwasser, Campingausrüstung, medizinische Notfallausstattung und Ersatzräder wie auch Tabak, Zucker und Decken als Gastgeschenke. Zu alledem prangte oben auf der Ladefläche noch ein nagelneues Fahrrad – die erbetene Bezahlung unseres Übersetzers. Mit einem großen Fahrradkorb, der auch eine Ziege aufnehmen kann.

Unser Fahrer tat sein Bestes, um der holprigen Piste zu folgen und gleichzeitig den Schlaglöchern und spitzen Felsen auszuweichen, doch meist kamen wir nur mühsam voran. Mehr als einmal blieben wir im Sand eines trockenen Flussbetts stecken. Da half alles nichts, wir mussten aussteigen und etwas Luft aus den Reifen lassen oder Äste unterlegen. Auch Landschaft und Tiere zu bestaunen motivierte manchen Halt. So sah ich einmal einen ganz enormen Skorpion. Ich habe schon Hummer gegessen, die kleiner waren. Schließlich erreichten wir die Siedlung nahe den Wasserfällen und schlugen dort unser Lager auf.

An diesem Kreuzungspunkt im Niemandsland treffen sich die namibischen Himba mit ihren Stammesgenossen aus dem Nachbarland Angola jenseits des Kunene. Hier werden auch Kontakte zu anderen Stämmen gepflegt, etwa zu den eng mit den Himba verwandten Herero, den Zemba, Thwa und Ngambwe. Missionare haben an diesem Ort ein strohgedecktes Kirchlein errichtet, außerdem gibt es ein kleines First-Class-Safaricamp, einen aus Wellblechplatten zusammengezimmerten Shop, der neben billigem Tabak hauptsächlich Maismehl und lauwarme Cola verkauft, sowie einen kommunalen Campingplatz, auf dem Besucher wie wir für fünfzig namibische Dollar (etwa sechs Euro) pro Nacht ihr Zelt unter Makalani-Palmen aufstellen können. Nur wenige Menschen leben das ganze Jahr über in dieser Siedlung; die Himba kommen jedoch regelmäßig dorthin, um Bestattungszeremonien abzuhalten, Erbschaften aufzuteilen, Vieh zu verkaufen und um Freunde und Verwandte zu besuchen. In dieser Zeit wohnen sie in provisorischen Hütten. ▶



Traditionelle Himba-Halsbänder, bunte Ketten des Zemba-Stammes und eine westliche Trainingsjacke – in der Siedlung bei den Epupa-Wasserfällen probieren junge Männer Neues aus. Die Himba-Frauen geben sich traditioneller.

Häuptling Hikuminwe Kapika, ein würdiger älterer Herr, empfing uns in seinem von Dornreisern umzäunten Kral. Das Gespräch begann verhalten, denn schon viele Journalisten hatten ihn interviewt, seinen Sorgen um die Zukunft des Stammes gelauscht und Artikel geschrieben, die Kapika nie zu Gesicht bekam. Er mochte mittlerweile auch bezweifeln, dass das Medienecho wirklich etwas änderte. Doch schließlich erzählte er: Dass er fürchtete, die fremden Arbeiter könnten das Vieh der Himba stehlen – keineswegs eine irrationale Angst, denn Ende des 19. Jahrhunderts wurden die Himba durch Raubzüge des weiter südlich lebenden Stammes der Nama beinahe ausgelöscht, und auch heute ist der Viehdiebstahl noch durchaus an der Tagesordnung. Außerdem bekümmert Kapika die Vorstellung, die Neuankömmlinge könnten wertvolles Weideland in Besitz nehmen und übernutzen. Die Familienverbände der Himba wechseln ihren Aufenthaltsort mehrmals im Jahr, sodass sich abgeweidete Gebiete immer wieder erholen können.

Vor allem aber: Der entstehende Stausee würde Hunderte von Grabstätten überfluten, die sowohl für die Religion als auch für die sozialen Strukturen dieses Volkes eine zentrale Rolle spielen. Durch rituelle Handlungen auf den Grabfeldern nehmen die Familienoberhäupter in Krisenzeiten Kontakt zu ihren Ahnen auf, und auch Streitigkeiten werden häufig über den Ruhestätten der Vorfahren beigelegt. Kommt es einmal zum Streit um Weidegründe, dann fragen die Himba: „Wie viele eurer Vorfahren sind hier beerdigt? Sind eure Ahnengräber älter als unsere?“

Häuptling Kapika mochte es besonders erzürnen, dass er die Bedenken und Ängste längst der Regierung hinterbracht und in Gesprächen dargelegt hatte, das Vorhaben aber dennoch weiter vorangetrieben wird. „Das ist auch nicht anders, als es unter der Apartheid der Weißen war. Wir Himba werden Widerstand leisten und gegen diese Pläne kämpfen. Mit Steinen und Speeren!“





Sozialer Wandel hat die Siedlungen rund um die Epupa-Wasserfälle bereits ergriffen. Regelmäßig lassen sich frisch bekehrte Himba-Christen von Mitarbeitern einer amerikanischen Missionsstation im Kunene taufen (links); dabei müssen sie versprechen, von traditionellen Gewohnheiten wie der roten Hautpaste und der Haartracht abzulassen. Ein kleiner Laden (unten) verkauft Grundnahrungsmittel, aber auch billigen Schnaps und Bier. Manchmal lungern dort Himba herum, um bei Touristen um Geld zu betteln – meist für Alkohol.

Vielleicht werden diese einfachen Menschen von den Politikern und Ingenieuren nicht ganz ernst genommen? Viele Himba kennen keinen elektrischen Strom und haben niemals ein Bauwerk gesehen, das höher als ein Stockwerk ist. Der Epupa-Damm würde immerhin 163 Meter hoch aufragen. Die Realisierung des Projekts wird über eine halbe Milliarde Euro verschlingen, später soll das Kraftwerk täglich 360 Megawatt Energie liefern.

Als die ersten Staudammexperten zu den Himba kamen, hatten die Stammesoberen noch keine Einwände gegen das Vorhaben. Warum auch, sie glaubten, es ginge um einen kleinen, aus Erde aufgeschütteten Damm, so wie sie selbst Dämme errichten, um ihr Vieh zu tränken. Lange Zeit redeten die Kommunikationspartner völlig aneinander vorbei.

Die namibische Journalistin Margaret Jacobsohn war vom Amt für Integrierte Ländliche Entwicklung und Naturschutz beauftragt worden, die soziale Seite des Vorhabens zu untersuchen. Sie erinnerte sich an ein besonders viel sagendes Erlebnis. Als sie eine Himba-Familie nahe den Epupa-Fällen zu ihrer Meinung über den geplanten Staudamm befragte, stieß Jacobsohn auf Unverständnis, obwohl sie das Wort der Behörden hatte, die Menschen seien informiert worden. Die Journalistin führte ihre erstaunten Gesprächspartner dennoch so gut wie möglich durch einen Fragebogen, und nach dem Interview wandte sich ein Familienmitglied mit einer Bitte an sie: Vielleicht könnte sie bei einem mysteriösen Schreiben helfen, das ihnen vor einiger Zeit ins Haus geflattert war? Der Mann kramte einen ockerverschmierten Umschlag hervor – den Informationsbrief der Regierung. Die Himba hatten das auf Englisch verfasste Schreiben noch nicht einmal geöffnet. Nachdem Jacobsohn den Brief übersetzt hatte, schüttelte ein alter Mann bedächtig den Kopf. „Wovon du redest, das ist der große Tod der Himba!“

Als einer der letzten Stämme dieser Erde führt dieses Volk fast völlig isoliert von der globalen Gesellschaft ein traditionelles Leben als Selbstversorger. Für Anthropologen sind sie besonders interessant, weil bei ihnen ein Prinzip der bilinearen Verwandtschaft gilt: Jedes Stammesmitglied gehört zu zwei Sippen, nämlich der väterlichen (dem Patriclan) und der mütterlichen Sippe (dem Matriclan). Dieser Brauch ist nicht sehr verbreitet, außer den Himba kennen ihn nur wenige Naturvölker in Westafrika, Indien, Australien, Melanesien und Polynesien.



Haben diese jungen Mädchen ein Recht auf Fortschritt, wie es die namibische Regierung proklamiert, oder auf kulturelle Identität?

Das Oberhaupt eines Himba-Patriclans ist immer der älteste Mann der Sippe. Die Söhne bleiben ihr Leben lang im Haus des Vaters; Töchter schließen sich also nach der Heirat dem Haushalt der Familie ihres Ehemannes an und werden zu Mitgliedern seines Patriclans. Doch die Vererbung des Vermögens – hauptsächlich Vieh – wird durch den Matriclan bestimmt. Somit erbt ein Sohn nicht das Vieh seines Vaters, sondern das seines Onkels mütterlicherseits.

Durch dieses Prinzip stehen in Krisenzeiten gleich zwei Familienverbände in unterschiedlichen Gegenden hinter dem einzelnen Stammesmitglied; das bringt besondere Vorteile für Völker, die wie die Himba im dürregeplagten Kaoko-Land in einer eher lebensfeindlichen Umwelt zurechtkommen müssen. Vermutlich hilft das Prinzip auch, Inzucht beim Vieh zu vermeiden, denn bei einigen Patriclans liegen Tabus auf Ziegen oder Rindern einer bestimmten Farbe oder Fellzeichnung. Wird ein Tier geboren, das die Tabus des Clans verletzt, muss es gegen ein „erlaubtes“ Tier aus einem anderen Patriclan ausgetauscht werden.

Selbst in der Religion der Himba spielt die bilineare Abstammung eine wichtige Rolle, denn die Ausübung ritueller Handlungen obliegt allein dem jeweiligen Patriclan. Die Himba glauben nämlich an einen Schöpfergott, der jedoch allen menschlichen Dingen so weit entrückt ist, dass sich ein Kontakt zu ihm nur durch die Anrufung der väterlichen Ahnen herstellen lässt. Im Mittelpunkt aller religiösen Riten stehen „heilige Feuer“, die ursprünglich über den Gräbern der Vorfahren entzündet wurden.

Noch heute wachen die Oberhäupter der Patriclans über das heilige Feuer ihrer Sippe – häufig nur ein glimmender Holzscheit inmitten von kreisförmig angeordneten Steinen zwischen dem Eingang der Hütte des Sippenoberhauptes und dem Pferch, wo das Vieh über Nacht angebunden wird. Dieser Bereich des Krals gilt als heilig; Fremde dürfen sich ohne ausdrückliche Erlaubnis nicht zwischen dem heiligen Feuer und dem Pferch oder zwischen dem Feuer und der Hütte bewegen. Am Tage obliegt die Bewahrung des heiligen Feuers traditionell dem Patriarchen, der über der Feuerstätte die Angelegenheiten der Familie mit den Ahnen bespricht. Am Abend trägt seine Frau einen Span des Feuers in die Haupthütte, um es damit am andern Morgen wieder neu zu entfachen.

Heute gilt das Interesse der Anthropologen besonders dem raschen sozialen Wandel, der das Volk der Himba ergriffen hat. Er zeigt sich unter anderem in Äußerlichkeiten wie Kleidung und Haartracht, und es fällt auf, dass sich wesentlich mehr Männer als Frauen den westlichen Gepflogenheiten anpassen. Bei der Siedlung an den Epupa-Fällen kann man denselben Himba-Mann an einem Tag im Lendenschurz und traditionellen Schmuck, am ▶

nächsten Tag jedoch mit Hemd und Hose bekleidet antreffen. Nur wenige unverheiratete Männer tragen in dieser Gegend noch den früher üblichen „Junggesellenzopf", und noch weniger verheiratete Männer halten sich an den Brauch, ihr ungeschnittenes Haar mit einem Turban aus weich gegerbtem Schafsleder zu umwickeln. Kaum ein Mann in der Siedlung reibt sich noch mit der Ockerpaste ein; viele waschen sich täglich mit Seife im Kunene.

Ganz anders jedoch die Frauen: Sie verhalten sich sehr viel konservativer hinsichtlich Kleidung und Haartracht; selbst bei den Epupa-Fällen tragen die meisten nichts als ihren Schmuck auf der unbedeckten Brust und die kompliziert gewickelten Schurze aus Ziegen- oder Kalbsleder um ihre Hüften. Sie reiben sich jeden Morgen sorgfältig von Kopf bis Fuß mit der Ocker-Butterfett-Creme ein und waschen sich fast nie mit Wasser. Bei den jungen Mädchen fällt das Haar in zwei dicken Flechten über Stirn und Gesicht, während verheiratete Frauen an den langen Kaskaden von dünnen, mit einer Schlammkruste überzogenen Zöpfen zu erkennen sind.

Nach Ansicht vieler Anthropologen halten die Himba-Frauen nicht einfach passiv an der Tradition fest: In Wahrheit widersetzen sie sich aktiv der Veränderung, weil sie nur so ihre gesellschaftliche Stellung bewahren können. Die Männer verdienen sich gelegentlich ein paar Namibia-Dollars durch Hilfsarbeiten oder durch den Verkauf von Vieh, den Frauen jedoch fehlen solche Möglichkeiten. Indem sie nun an traditionellen Werten festhalten, verfolgen die Himba-Frauen eine Strategie, die in der modernen Anthropologie als „Wandel durch Kontinuität" oder „aktiven Konservatismus" bezeichnet wird. „Gerade das scheinbare Verharren in der Tradition kann eine strategisch sinnvolle – und sehr vernünftige – Reaktion auf die Ereignisse der heutigen Zeit sein", sagt Margaret Jacobsohn.

Doch kann Namibia auf ethnische Probleme Rücksicht nehmen? Jesaya Nyamu, Namibias zuständiger Minister für Bergbau und Energie, wird bei meinem Besuch in der Hauptstadt Windhoek nicht müde zu betonen, dass sein Land zur Zeit sechzig Prozent seiner Energie vom Nachbarland Südafrika importiert. Hier eine Alternative zu schaffen, hält er für ein Gebot der nationalen Souveränität. „Keiner sieht, wie dringend unser Land eine unabhängige Stromproduktion braucht!" All jenen ausländischen Umweltschutzgruppen, die sich in die Staudammdiskussion seines Landes einmischen, unterstellt der Minister deshalb eine Doppelmoral. „Diese Leute messen mit zwei verschiedenen Maßstäben: Einem für ihre eigenen, industrialisierten Länder, und einem anderen für solche, die sie für unberührt und exotisch halten. Oder stehen in Europa und Amerika nicht überall Dämme?"

Er hat nicht Unrecht: Auf Platz zwei in der Rangliste der Betreiber von über neunzig Meter hohen Staudämmen folgen die USA auf China, so die Auskunft der ICOLD (Internationale Kommission für Große Talsperren, eine unabhängige Fachorganisation mit Sitz in Paris). Und dabei ging die heute reichste Nation der Welt nicht gerade zimperlich mit den Rechten ihrer eingeborenen Bevölkerung um: Als im Jahre 1934 der Grand-Coulee-Damm im Bundesstaat Washington den Columbia River aufstaute, wurde die Heimat der Colville- und Spokane-Indianer überflutet, gleichzeitig beraubte man sie ihrer Lebensgrundlage, der Lachsfischerei. Im Jahr 1951 forderten die Indianer erstmals Schadenersatz, 1994 akzeptierten sie ein Angebot der amerikanischen Regierung: Jedes Jahr, so lange der Staudamm Strom produziert, erhalten sie Reparationszahlungen in Höhe von 15 Millionen Dollar, dazu kommt eine einmalige Entschädigungssumme in Höhe von 54 Millionen Dollar.

In Namibia ist der politische Streit um den Damm inzwischen voll entbrannt: Völlig überflüssig, befindet Oppositionsführer Katuutire Kaura, denn ein flussaufwärts bei Ruacana gelegenes Stauwerk aus den 70er Jahren arbeite derzeit bei weniger als zwanzig Prozent seiner Kapazität. Und in den kürzlich entdeckten Kudu-Erdgasfeldern vor Namibias Südküste vermutet man 560 000 Kubikmeter Erdgas – mehr als genug für die Bedürfnisse des ganzen Landes. „Das reicht für zwanzig bis dreißig Jahre", bekräftigt Kaura. Zurzeit arbeitet die namibische Regierung gemeinsam mit dem Erdölkonzern Shell an der Erschließung dieser unverhofften Energiequelle.

Und was die Himba beträfe, mutmaßt Kaura weiter, würden die Eingeborenen kaum vom Damm profitieren, aber einen hohen Preis dafür bezahlen. Da sie für die – ohnehin nur vorübergehend – anfallenden Arbeiten nicht qualifiziert sind, bringt er ihnen kaum Jobs. Eine nomadische Lebensweise und geringer Besitz sind auch nicht förderlich, in den Genuss des elektrischen Stroms zu kommen. Das war in Opuwo am Ruacana-Damm nicht anders – erst gute zwanzig Jahre nach dem Bau des Kraftwerks wurde der Ort elektrifiziert. „Der Damm wird die Himba an den Rand der Gesellschaft abdrän-


© SCHAPOWALOW / HUBER

Literaturhinweise

Ochre & Water. Himba Chronicles from the Land of Kaoko. Ein Film von Craig Matthew und Joelle Chesselet. 2001. Im Vertrieb von Off The Fence B. V. Nieuwe Herengracht 31, N-1011 RM Amsterdam (E-Mail: info@offthefence.com).

Dams and Development: A New Framework for Decision-Making. World Commission on Dams, 2000.

Himba: Nomads of Namibia. Von Margaret Jacobsohn, Peter Pickford und Berverly Pickford. Struik Publishers, Cape Town, 1990.

Weblinks zum Thema und Informationen über Dammprojekte weltweit finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Aktuelles Heft".*



Die Wasserfälle von Epupa – wie lange wird es dieses Naturschauspiel noch geben?

gen, wo sie nicht überleben können", prophezeit Phil Ya Nangoloh, Leitender Direktor von Namibias Nationaler Gesellschaft für Menschenrechte.

In diesem Zusammenhang warnt die Weltstaudammkommission davor, dass solche Großprojekte häufig der ortsansässigen Bevölkerung Ressourcen rauben, die für Nahrung und Auskommen wichtig sind, und einer anderen Bevölkerung an einem anderen Ort zuführen. Der Zweck großer Staudämme läge gewissermaßen darin, Flüsse und Landschaften zu „exportieren". Die Kommission fordert deshalb auf, eher eine nachhaltige Energiewirtschaft zu etablieren, die vorhandene Ressourcen beispielsweise durch ein besseres Management intensiver nutzt und auf erneuerbare Energien setzt.

Der Wind bläst der namibischen Regierung ins Gesicht. Immerhin hat die Weltbank bereits verkündet, das Dammprojekt auf keinen Fall zu finanzieren. So ist es nicht erstaunlich, dass Mitte vergangenen Jahres ein neues Konzept publik wurde: Ein riesiger Windpark in der Großen Bucht nahe der Küstenstadt Luderitz soll drei bis zehn Megawatt Leistung liefern und so die Unabhängigkeit vom Stromlieferanten Südafrika sicherstellen.

Was, wenn die Regierung ihre Staudamm-Pläne doch weiter vorantreibt? An meinem letzten Morgen im Camp bitte ich unseren Kontaktmann Tjiuma um seine ehrliche Einschätzung der Lage. In der tiefen morgendlichen Stille, die über dem Kunene liegt, bekennt er, dass die Himba bereits Widerstandspläne schmieden. Mehr als fünfzig ihrer Häuptlinge kämpften im Unabhängigkeitskrieg, sagt er, und die alten Gewehre liegen noch in ihren Hütten.

Eine Woche später, als ich den Energieminister in Windhoek treffe, frage ich ihn vorsichtig, was die Regierung in einem solchen Fall zu tun gedenke. Er drohte massive Gegengewalt an, räumte aber ein: „Ich glaube nicht, dass es dazu kommen wird." Vielleicht gönnt der Fortschritt dem Kaoko-Land tatsächlich noch einen Aufschub. ■

Carol Ezzell *ist Redakteurin bei Scientific American.* *Für ergänzende Informationen dankt Spektrum der Wissenschaft Lori Pottinger, beim International Rivers Network verantwortlich für den Bereich Südafrika.*



Rückkehr aus Tibet

Heinrich Harrer, prominenter Bergsteiger und Mitglied der deutschen Himalaja-Expedition 1939, wurde bei Kriegsausbruch in Indien interniert. Drei Jahre später gelang zusammen mit dem Bergkameraden Peter Aufschnaiter die Flucht nach Tibet. Zwei Jahre brauchten sie, um Lhasa, die Hauptstadt, zu erreichen. Dort erwarb Heinrich Harrer überraschend schnell das Vertrauen des verschlossenen Dalai Lama: Er konnte ihm die Handhabung einer Leica erklären, mit der niemand umgehen konnte. – Mit vielen tausend wertvollen Photos kehrte Harrer jetzt in die Heimatstadt Graz zurück. *(Photo-Magazin, April 1952, S. 78)*

Fortschritte am Spitzenemissions-Mikroskop

E. W. Müller, der Erfinder des Feldemissions- oder Spitzenemissions-Mikroskops (einer Abart des Elektronenmikroskops) konnte in Berlin Dahlem bei seinen schönen Versuchen, Atome und Moleküle sichtbar zu machen, weitere Erfolge erzielen. Es ist ihm gelungen, sein Gerät nun auch mit positiver statt mit negativer Spitze zu betreiben. Dabei gehen von der Spitze keine Elektronen mehr aus, sondern positive Ionen. Protonen bilden die Spitze und alles, was an ihr vorgeht, in ganz derselben Weise ab wie früher die Elektronen. Die Protonen haben den Vorteil, weit schärfere Abbildungen zu liefern, weil ihre Wärmebewegung, die ja hauptsächlich für eine etwaige Unschärfe verantwortlich ist, relativ niedriger ist als die der Elektronen. *(Kosmos, Heft 4, 48 Jg., 1952, S.189)*

Ein neuartiges Fahrrad

Die Grundgedanken, die zum Bau der im Straßenbild heutzutage vielfach vertretenen Motorroller geführt haben, nämlich in der Hauptsache die Rücksicht auf die Beinfreiheit, haben jetzt auch zur Planung eines entsprechenden Fahrrades Veranlassung gegeben. Außer dem erstrebten Wegfall des die Benutzung erschwerenden hohen, flächenförmigen Rahmens des normalen, großrädrigen Fahrrades ist durch die Neukonstruktion auch noch ein wirksamer Schutz der Kleidung vor der immer öligen Kette erreicht und außerdem ein praktischer, verschließbarer Transportraum für kleines Gepäck geschaffen worden. Der aus zwei Hälften zusammengesetzte Tragkörper umschließt alle Antriebsteile … *(Umschau, Heft 7, 52. Jg., 1952, S. 220)*

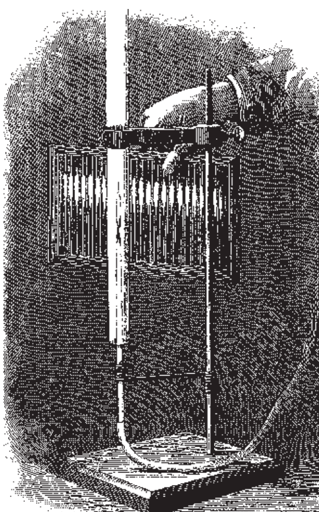


Die neuartige Fahrradkonstruktion ist dem Motorroller abgeschaut.



Warum „setzt“ sich nasser Sand?

Die Volumenverkleinerung des Sandes bei Befeuchtung ist jüngst von van der Mensbrugghe wissenschaftlich untersucht worden. Er nimmt an, dass das Zusammensinken des Sandes bei Befeuchtung dadurch bedingt ist, dass die von den einzelnen Sandkörnchen an ihrer Oberfläche verdichtete Luftschicht infolge der stärkeren Anziehung zwischen Sand und Wasser von letzterem verdrängt wird; dadurch sei nun aber wieder die Anziehung der einzelnen von Wasserhüllen umgebenen Sandkörnchen erhöht und so erkläre sich das verringerte Gesamtvolumen. *(Naturwissenschaftliche Wochenschrift, Neue Folge I. Bd., Nr. 28, 1902, S. 333)*



Tönende Flammen

Die Eigenschaft der Wasserstoffflamme (ist es), in einem über sie gehaltenen Glasrohre die Luft in Schwingungen und dadurch zum Tönen zu bringen. … Der Physiker Tyndall u. A. haben eine ganze Reihe von diesfälligen Versuchen beschrieben, die mit einfachen Hilfsmitteln sich erfolgreich bewerkstelligen lassen. … Die Töne werden durch die rasch aufeinander folgenden Schwingungen der Flamme hervorgebracht, indem die über der Flamme befindliche Luftsäule des äußeren Glasrohres mit gleichen Schwingungsverhältnissen wie die Flamme gleichfalls zum Tönen gebracht wird und gleichsam als Resonator dient. Zur Analyse der schwingenden Flamme dient ein Spiegel, der im Hintergrunde des Bildes zu ersehen ist und das Bild der Flamme und ihrer Oscillationen reflectirt. *(Der Stein der Weisen, 27. Bd., 1902, S. 30)*

Mit diesem Apparat lassen sich „tönende Flammen“ hervorrufen.

Vereinigung von Sauerstoff und Wasserstoff

Durch eine neue Methode zur Darstellung von sehr reinem Wasserstoff und Sauerstoff, nämlich durch Elektrolyse einer Lösung von sehr reinem Baryumhydroxyd, ist es H. B. Bakar gelungen, diese Gase so rein und trocken darzustellen, dass Röhren, welche dieselben enthalten, zur Rothgluth erhitzt werden können, ohne dass eine Vereinigung der Gase stattfindet, während Röhren, welche die ungetrockneten Gase enthalten, beim Erhitzen leicht explodiren. Nach der Einführung einer kleinen Menge destillirten Wassers in die trockenen Röhren erfolgt sofort Explosion. Bei Gasen, welche man nur zwei Tage in Berührung mit destillirtem Phosphorpentoxyd hatte stehen lassen, fand nur eine langsame Vereinigung statt. … Daher scheint es, dass Wasser nicht der einzige wirksame Factor ist bei der Explosion des erhitzten Gemisches. *(Zeitschr. f. d. ges. Kohlensäure-Ind., 8. Jg., Nr. 8, 1902, S. 249)*

PHOTOVOLTAIK

Masse plus Klasse

Hohe Wirkungsgrade erreichten Solarzellen bislang nur im Labor. Ein Trick bringt frischen Wind in die Serienproduktion.

Von Ralf Preu und Stefan Glunz

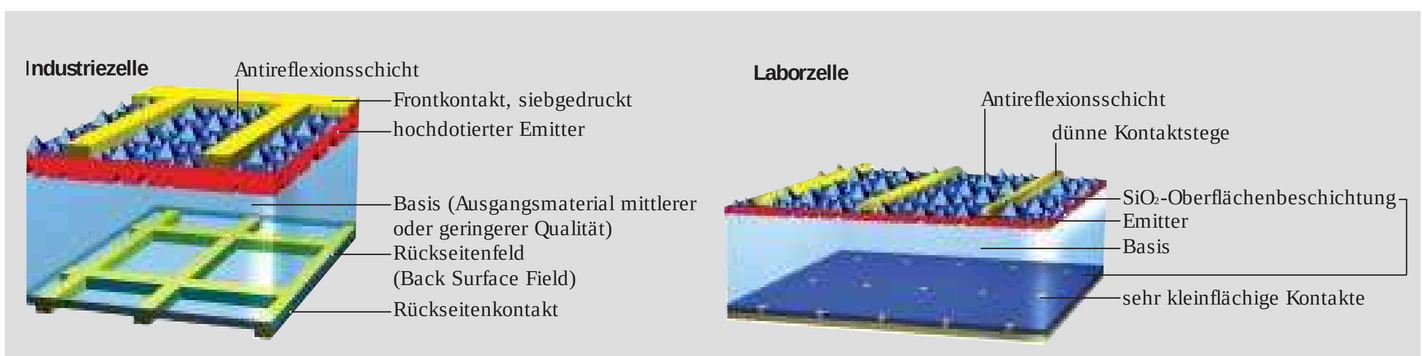
Die Idee besticht: Das Licht der täglich gegenwärtigen Sonne direkt in elektrischen Strom zu wandeln, sollte unsere Energieversorgung auf Dauer sichern und die problematische Verbrennung fossiler Energieträger ersetzen. Doch vorläufig ist diese „Photovoltaik" für eine flächendeckende Stromversorgung zu teuer. Die Gründe sind vielschichtig: Kommerzielle Solarzellen vermögen nur etwa 12 bis 14 Prozent des auftreffenden Lichts zur Stromgewinnung zu nutzen. Dabei ist die pro Flächeneinheit eingestrahlte Energie zudem relativ gering. Beide Umstände vergrößern den Flächenbedarf der Module (Baugruppen aus Solarzellen), insbesondere in Ländern, die nicht ständig unter blauem Himmel liegen.

Zum Glück sind die Grenzen dieser Technik noch längst nicht erreicht. Das zeigt ein Blick in die Labors der Forschungsinstitute weltweit: Dort zeigen Solarzellen-Prototypen Wirkungsgrade von bis zu 24 Prozent, das sind lediglich vier Prozent weniger als physikalisch möglich. Noch dazu gelingt es, solche Zellen mit Siliziumscheiben zu realisieren, die weniger als 0,1 Millimeter stark sind – heutige Zellen benötigen mehr als das Dreifache. Zwei Drittel der Kosten einer Solarzelle fallen aber für das Material an – je dünner, desto billiger wird die Fertigung. Außerdem werden solche Solarzellen sogar flexibel, was dann zusätzliche Anwendungen wie gewölbte Module ermöglicht. Leider sind die im Labor eingesetzten Fertigungsprozesse sehr aufwendig und nur schlecht in eine Massenfertigung umsetzbar. Vor kurzem ist es uns aber gelungen, eine nahezu ideale Struktur mit deutlich einfacheren Mitteln herzustellen.

Sie optimiert den Prozess der Lichtwandlung, indem sie Verluste minimiert und somit den Wirkungsgrad erhöht. Dazu ein Blick auf die Physik: Die Energie des einfallenden Lichts wird im Silizium-Halbleiter von Elektronen aufgenommen, die so in einen angeregten Zustand kommen, mithin beweglich werden. Gleichzeitig entsteht an der Stelle, an der sie sich befanden, ihr positiv geladenes Pendant, die Löcher, die nun ebenfalls durch den Kristall reisen können (siehe den Kasten auf Seite 88). Treffen beide aufeinander, heben sie sich gegenseitig auf, und die aufgenommene Energie geht dabei dem äußeren Stromkreis verloren. Dieser für eine Solarzelle ungünstige Vorgang wird „Rekombination" genannt.

Mancherlei fördert diesen Prozess. Dazu gehören insbesondere auch Fehler des Kristalls, da sie neue mögliche Energiezustände bereitstellen, die eine Rekombination erleichtern. Der wohl größte „Kristallfehler" ist die Kristalloberfläche selbst – die regelmäßige Struktur wird dort massiv unterbrochen. Tatsächlich findet man sowohl beim Übergang vom Siliziumkristall zu Luft als auch zu metallischen Kontaktflächen sehr hohe Rekombinationsraten. Deshalb bringen Wissenschaftler bei hocheffizienten Prototypen dünne dielektrische Schichten aus Siliziumdioxid oder Siliziumnitrid auf die Rückseite auf. Diese verringern wieder die Anzahl möglicher Zustände





Reinere Ausgangsmaterialien, aber auch strukturelle Feinheiten machen den Unterschied zwischen industriell gefertigten Solarzellen mit Wirkungsgraden zwischen 12 und 14 Prozent und hocheffizienten Laborsystemen aus, die bereits 24 von möglichen 28 Prozent des auftreffenden Lichtes umwandeln.

Beispielsweise bringt man bei Letzteren dielektrische Schichten auf der Rückseite auf, um die Diffusion der Elektronen in dieser Richtung zu behindern. Bei Industriezellen wird durch Dotieren ein elektrisches Feld erzeugt, das die Abwanderung begrenzt; diese Methode ist aber weniger effektiv.



PREMIUM

So strahlend sonnig muss es nicht sein. Auch bei bedecktem Himmel könnten Photovoltaik-Module auf dem Dach genug Strom liefern – allerdings nur bei höherem Wirkungsgrad der Zellen als derzeit noch üblich.

im Bereich der Oberfläche; man spricht von Passivierung. Der Nachteil der Methode: Da diese Schichten isolieren, müssen punktuell Öffnungen für die Stromableitung eingebracht werden. Je kleiner diese Kontaktfläche insgesamt ist, desto weniger Ladungsträger rekombinieren. Andererseits erhöhen weite Strecken zwischen den Anschlusspunkten den elektrischen Widerstand, was seinerseits die elektrische Leistung reduziert. Als Kompromiss verteilt man mehrere Tausend winziger und nahe beieinander liegender Kontaktpunkte über die Solarzellenrückseite.

Leider eignete sich aber genau dieses so erfolgreiche Vorgehen bislang nicht für die Massenproduktion, setzten die Entwickler dabei doch auf die Photolithographie: Hierbei wird ein lichtempfindlicher Lack auf die Halbleiterscheibe aufgetragen, durch eine Maske mit der Kontaktstruktur belichtet und dann entwickelt. Danach liegen die zu kontaktierenden Punkte frei, und man kann die dielektrische Schicht darauf gezielt wegätzen. Anschließend wird ganzflächig beispielsweise eine zwei Mikrometer starke Aluminiumschicht aufgedampft, die in den geöffneten Punkten das Silizium kontaktiert und die Stellen auch leitend verbindet.

Obwohl diese Strukturierungstechnologie den Massenmarkt für Chips erst ermöglicht hat, ist sie für die Fertigung der viel größeren Solarzellen zu teuer: Während ein Siliziumwafer am Ende der Verarbeitung Hunderte von Mikroprozessoren enthält und viele tausend Euro wert ist, entsteht bei gleichem Materialeinsatz nur eine Solarzelle im Wert von unter fünf Euro. Deshalb versuchten wir, diesen Schritt mit einer kostengünstigeren Technologie umzusetzen.

Zunächst trugen wir die isolierende Schicht direkt mit einem gepulsten Hochleistungslaser ab, um die Photolithographie zu ersetzen. Trotz sehr guter Leistung der so hergestellten Solarzellen waren wir nicht zufrieden, denn der Laserschuss hatte stets das unter dem Dielektrikum liegende Silizium geschädigt. Vor dem Aufdampfen der Metallkontakte musste dieses Material weggeätzt werden, um einen hinreichend niedrigen elektrischen Widerstand zu erreichen.

Zur Verbesserung des Kontakts erhitzten wir die ganze Solarzelle meist noch einmal einige Minuten auf 400 Grad Celsius. Dabei verschlechterte sich leider die Passivierung, die Folge waren erhöhte Rekombinationsraten. Gleichzeitig sank aber der Widerstand massiv – die dielektrische Schicht zwischen den Kontaktpunkten hatte anscheinend ihre Sperreigenschaft verloren. Vermutlich löste sie sich in einem Gemisch aus Aluminium und Silizium. Damit war die Idee für eine umgekehrte Prozessfolge geboren. Das Rezept lautet: Bringe zuerst eine Aluminium-Schicht ganzflächig auf und schmelze dann das Metall sowie das darunter liegende Silizium punktweise mit dem Laser. Beim Erstarren ergibt sich dann der gewünschte Kontakt. Dank kurzer Laserpulse bleiben die benachbarten, isolierenden Gebiete intakt.

Auf Anhieb erreichten wir auf diese Weise einen Wirkungsgrad von über 21 Prozent. Die Qualität der Kontakte war so gut, dass sich ihre Gesamtfläche sogar noch verringern ließ. Derzeit versuchen wir, die mittlere Prozesszeit pro Kontaktpunkt von etwa 0,1 Sekunden weiter zu ▶

Stichwort: Solarzelle

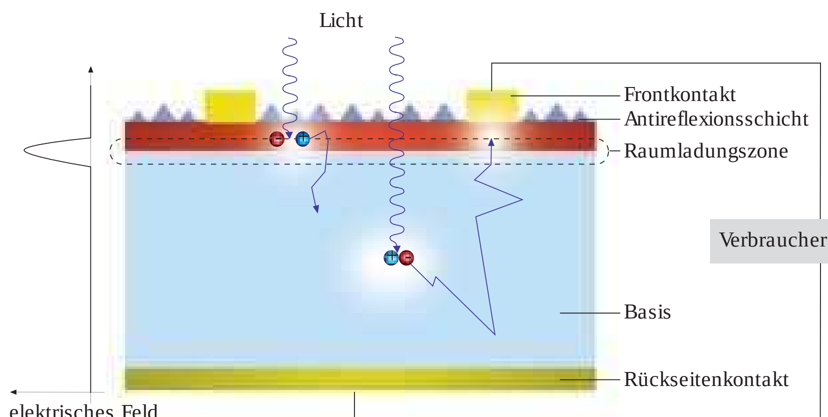
Trennende Basis

Kernstück einer Solarzelle ist ein Halbleiterkristall, der auf Sonnenlicht mit einem elektrischen Strom reagiert. Das verdankt er einer Energielücke: Im Kristall überlagern sich die Energieniveaus einzelner Atome zu Energiebändern. Gerade noch gebundene Elektronen besetzen das so genannte Valenzband, im Kristall frei bewegliche, also Strom leitende Elektronen das Leitungsband. Dazwischen liegt eine schmale Energielücke; Sonnenlicht reicht aus, sie zu überbrücken.

Nicht nur Elektronen gehen dann auf die Reise durch den Kristall: Wo sie fehlen, zeigen die „hinterbliebenen" Atomkerne eine nun überschüssige positive Ladung; diese „Löcher" können sich ebenfalls frei bewegen. Durch Dotieren, also gezieltes Hinzufügen von Fremdatomen mit einem überschüssigen oder fehlenden Valenzelektron, lässt sich das Entstehen von Leitungselektronen beziehungsweise -löchern lokal erleichtern; man spricht deshalb von n- beziehungsweise p-dotierten Bereichen. Auch ohne Lichteinfang entstehen dort freie Ladungsträger. Wenn sie an der Nahtstelle zwischen zwei solchen Zonen auf die jeweils andere Seite diffundieren, bauen die verbleibenden Atomrümpfe ein elektrisches Feld auf. Dieser Bereich wird als Raumladungszone bezeichnet.

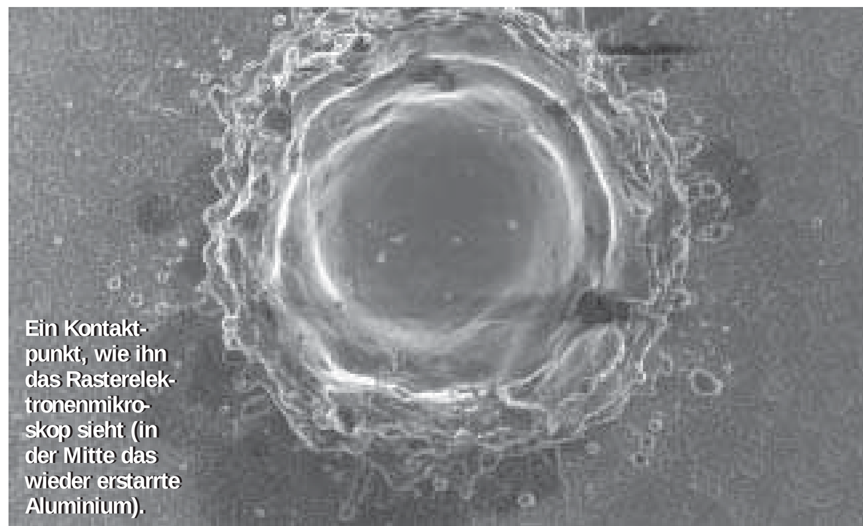
Eine Solarzelle – ebenso wie eine Fotodiode – umfasst somit drei Bereiche: In einer schmalen Zone an der Vorderseite findet man eine hohe Elektronenkonzentration, aber kein elektrisches Feld (Emitter), dann folgt ein noch schmalerer Bereich mit einem elektrischen Feld (Raumladungszone) und schließlich der größte Teil mit einer hohen Löcherkonzentration (Basis). Auf Vorder- und Rückseite werden nun noch metallische Elektroden aufgebracht – vorn in Form eines lichtdurchlässigen Gitters –, und fertig.

Fällt nun Licht auf eine Solarzelle, gelangen zusätzliche Elektronen in das Leitungsband; gleichzeitig entstehen auch neue Löcher. Das Feld in der Raumladungszone sorgt nun dafür, dass Elektronen aus dem p-dotierten Bereich hinüber in den n-dotierten wandern, Analoges geschieht bei den Löchern. Ohne weiteres Zutun trennen sich die Ladungen also, und es entsteht eine elektrische Spannung. Schließt man jetzt einen Verbraucher an, fließt Strom.



Licht erzeugt im Halbleiter Elektron-Loch-Paare. Das Feld in der Raumladungszone zieht die Elektronen in den n-dotierten Emitter, Löcher in die p-dotierte Basis.

verringern. Immerhin müssen in der industriellen Serienproduktion einige tausend Kontaktpunkte pro Sekunde entstehen, und zwar in maximal drei Sekunden. Da moderne Festkörperlaser auch bei hohen Pulsenergien Pulsfrequenzen von bis zu hundert Kilohertz erreichen, ist dies nicht das eigentliche Problem. Schwieriger ist der lange Weg von über zehn Metern, den der Laserstrahl insgesamt auf der Siliziumscheibe zurücklegen muss. Diese unter ihm vorbeizuführen würde viel zu lange dauern. Deshalb setzen wir jetzt auf Spiegelsysteme, die den Strahl mit mehreren Metern pro Sekunde bewegen. Die Kontaktpunkte werden dabei sozusagen im Flug erzeugt. Mittlerweile hat das Institut ein Patent für diesen Prozess angemeldet. Gemeinsam mit Industriepartnern wollen wir das System innerhalb der nächsten drei Jahre markttauglich machen. ■



FHG-ISE

Ein Kontaktpunkt, wie ihn das Rasterelektronenmikroskop sieht (in der Mitte das wieder erstarrte Aluminium).

__Ralf Preu__ studierte Physik und Wirtschaftswissenschaften. Er promovierte am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg zum Thema „Innovative Produktionstechnologien für kristalline Silicium-Solarzellen" und leitet nun die gleichnamige Forschungsgruppe. Der promovierte Physiker __Stefan Glunz__ leitet am gleichen Institut die Gruppe „Solarzellen aus monokristallinem Silicium".

SPORTTECHNIK

Elektronischer Trainer

Sensorik plus Chips sollen die Bewegungsmuster von Schwimmern erfassen und helfen, ihr Training zu optimieren.

Von Martin Boeckh

Spitzensportler haben es heute schwer, ihre Leistungen zu steigern. Die Physiologie des Körpers bietet kaum noch Potenzial, um die Bruchteile von Sekunden schneller zu sein als die ebenso gestählte Konkurrenz. Die größten Chancen bietet daher die Optimierung der Technik. Deshalb ziehen Schwimmerinnen und Schwimmer ihre Bahnen gegen den Widerstand von Seilen und unter steter Videoüberwachung. Ein „Abfallprodukt" der Forschungen am European Media Laboratory (EML) in Heidelberg könnte ihr Training künftig erleichtern und noch effektiver machen – der so genannte Digicoach.

Das private Forschungsinstitut für angewandte Informatik entwickelt im Rahmen des Projekts „Dr. Feelgood" informationsverarbeitende Systeme, die alltägliche Lebensvorgänge erfassen und auswerten, um daraus wertvolle Informationen für den Benutzer abzuleiten. Das können Angaben über den Blutdruck sein, aber auch Informationen über Fehlbelastungen nach einer Hüftoperation.

Der Physiker Steffen Noehte und sein Team verwenden zur Bewegungsanalyse Beschleunigungssensoren, wie sie in der Automobilindustrie heute üblich sind. Das sind beispielsweise mikromechanische Doppel-Plattenkondensatoren, deren Dielektrikum an einer beweglich aufgehängten Masse fixiert ist. Bei einer Beschleunigung wird es verschoben und so die Kapazität des Kondensators verändert.

Wenn für jede Raumrichtung ein eigener, linearer Beschleunigungssensor verwendet und dieser noch mit einem Messfühler für Drehwinkel kombiniert wird, lässt sich die Bewegung eines Körpers im Raum in allen drei Richtungen des Koordinatensystems beschreiben und analysieren. Mit Unterstützung des Heidelberger Instituts für Sport und Sportwissenschaft (ISSW) konnte der Physiker Markus Buchner zeigen, dass schon handelsübliche Sensoren, Datenspeicher, Rechner und Software das Training von Schwimmern verbessern können.

Er packte Sensoren, Datenspeicher und Batterie in eine wasserdichte Plastikschachtel von der Größe eines Walkmans und befestigte sie mit einem Gürtel am Rücken eines Schwimmers. Vom Startsprung weg über jeden einzelnen Schwimmzug und die Wende bis hin zum Zielanschlag registrierte der Rechner online und lückenlos die Beschleunigungswerte im Schwerpunkt des Schwimmers. Gleichzeitig wurden in der ersten Untersuchungsphase synchron Videoaufnahmen erstellt.

Den einzelnen Bewegungsphasen beim Schwimmen lassen sich charakteristische Beschleunigungsmuster zuordnen; beispielsweise bremst das Anziehen der Beine beim Brustschwimmen kurzzeitig die Bewegung. Mit diesem Wissen kann man aus den Beschleunigungswerten und der verstrichenen Zeit Geschwindigkeiten und Wegstrecken berechnen und die Messkurven den Einzelbildern der Videoaufnahme zuordnen. Anhand dieser Fülle von Informationen sollten Schwimmtrainer jeden noch so kleinen und bislang verborgenen Technikfehler entdecken können.

Doch bis zur Serienreife eines digitalen Coachs ist es noch weit. Bislang ließen sich die Daten nur per Datenleitung in guter Qualität an den Rechner übermitteln. „Wenn jemand ständig am Beckenrand ein Kabel nachführen muss, hat das System natürlich keine Zukunft", räumt Noehte ein. Daher arbeiten die Wissenschaftler an einem Funksender im Vier-Megahertz-Bereich, in dem sich jeder genehmigungsfrei tummeln darf. Doch das ständige Auf- und Abtauchen im Wasser verstimmt die Antenne. Die Lösung wäre eine Empfangsantenne in dem Wasserbecken. Für den Breitensport käme wohl nur ein Zwischenspeichern der Daten auf einem handelsüblichen Chip oder einer Flashkarte in Frage.

Der Trainer der Zukunft, so sieht es auch der Sportwissenschaftler Klaus Reischle am Olympiastützpunkt Heidelberg, wird kaum umhin kommen, Computerdaten zu analysieren und Kurven auszuwerten. Der Schwimmer selbst soll über Leuchtdioden (LEDs) in der Schwimmbrille während des Trainings Abweichungen von Sollwerten erkennen können. Inzwischen hat der Deutsche Sportbund Interesse gezeigt und wird die Entwicklung finanziell unterstützen, um den elektronischen Trainer auch für andere Sportarten nutzbar zu machen. ■

*Der Wissenschaftsjournalist **Martin Boeckh** studierte Physik und Geografie. Er befasst sich mit Themen rund um die Technik und arbeitet in Gaiberg bei Heidelberg.*



MARTIN BOECKH

Eine ausgetüftelte Sensorik misst die Beschleunigungen beim Schwimmen. Doch wie sollen die Daten an Land gelangen? Die Übertragung per Antenne ist noch nicht der Weisheit letzter Schluss.

BATTERIE

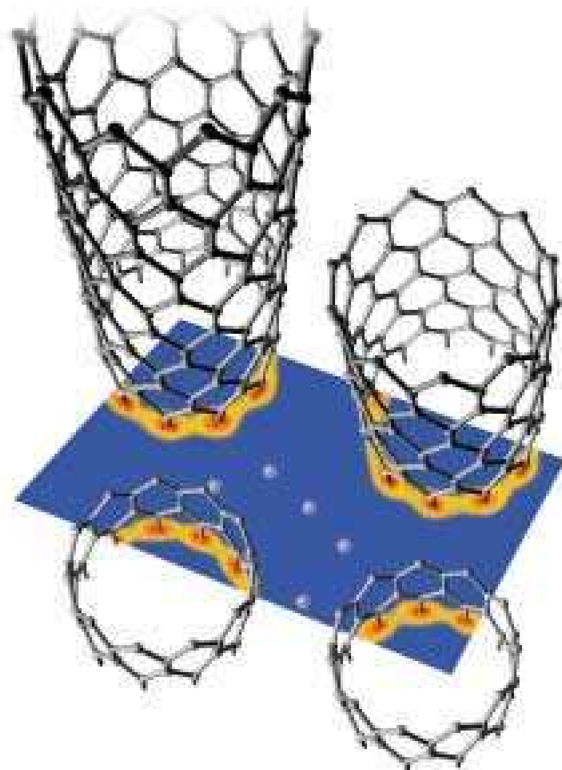
Mehr Power dank Nanoröhren

Das Rezept für den Superakku: Man nehme Lithium-Ionen-Akkus und ersetze Graphit durch Kohlenstoff-Nanoröhren.

Von Werner Gans

Der Markt für Batterien und vor allem wiederaufladbare Akkus boomt, denn Handys, Camcorder, Notebooks, elektronische Terminkalender und ihre mobilen Verwandten benötigen reichlich Strom. Laut dem Beratungsunternehmen Frost & Sullivan setzte die Branche allein in Europa 1999 fast drei Milliarden Euro um, im Jahr 2006 könnten es sogar mehr als 4,6 Milliarden werden.

Akkumulatoren sollten klein, leicht, sicher und möglichst umweltfreundlich sein, aber auch über lange Zeit hohe Spannungen liefern und weit über tausend Lade-Entlade-Zyklen ohne Qualitätseinbuße überstehen. Hochpreisige Kandidaten sind Lithium-Ionen-Akkus, mit denen man Zellspannungen von bis zu vier Volt erreicht – Nickel-Cadmium- und Nickel-Metallhydrid-Akkus kommen nur auf die Hälfte. Nun soll die Latte doppelt so hoch gelegt werden – das Zauberwort heißt Kohlenstoff-Nanoröhren (Spektrum der Wissenschaft, Spezial 2/2001, S. 48).



GRAFIK: THOMAS BRAUN / QUELLE: PHYSICAL REVIEW LETTERS, BD. 85, HEFT 8, S. 1706, 2000

Und so funktioniert's: Lithium-Ionen werden zwischen Nanoröhren eingelagert und erhöhen die negative Ladung (rot) an den Kohlenstoffatomen.

Das einfach positiv geladene Ion des Elements Lithium hat für dieses Anwendungsgebiet attraktive Eigenschaften: Als Alkalimetall gibt es sein äußerstes Elektron bereitwillig ab, das dabei entstehende Ion ist klein und leicht. Metallisches Lithium lässt sich in Batterien jedoch nicht verwenden, wie erste Versuche rasch zeigten: Kurzschlüsse waren häufig, dabei wurde die Zelle heiß und verabschiedete sich unter Rauchzeichen. Nun war schon lange bekannt, dass man in Graphit, einem aus Kohlenstoffringen bestehenden Kristall mit Schichtstruktur, Fremdatome einlagern und sogar partiell chemisch binden kann (fachlich heißen solche Komplexe Interkalations- beziehungsweise Einlagerungsverbindungen).

Ein eingelagertes Lithium-Atom gibt sein äußerstes Elektron an den Kohlenstoff ab, das resultierende Ion ist nur 0,12 Nanometer groß, es passt daher gut zwischen die Kohlenstoffschichten von Graphit, deren Abstand etwa 0,337 Nanometer beträgt. Rein theoretisch könnte jeder Kohlenstoff-Sechsring im Graphit ein Lithium-Ion binden, jedoch ist die Abstoßung zwischen den positiven Ionen so groß, dass nur jeder zweite Platz besetzt wird. Somit kommen auf ein Lithium-Ion im Schnitt sechs Kohlenstoffatome, über die die negative Ladung „verschmiert" ist (siehe Bild links).

Wegen dieser negativen Ladung bildet also in der Batterie der mit Lithium-Ionen angereicherte Graphit die Anode, die beim Entladevorgang Elektronen an den Verbraucher abgibt. Im Inneren des Akkus diffundieren währenddessen die positiven Lithium-Ionen zur Kathode, wo die Elektronen über den äußeren Stromkreis wieder ankommen. Die Kathode besteht in der Regel aus einem Lithium-Metall-Oxid, wobei das Metall Kobalt (das leicht toxisch und daher bedenklich ist!), Nickel oder Mangan sein kann. Diese Oxide haben ebenfalls eine Schichtstruktur, in welche die Lithium-Ionen hineindiffundieren können. Beim Laden treibt man diese unter Aufwendung von elektrischer Energie wieder in den Graphit hinein, kehrt den Vorgang also um.

Weil das Lithium-Ion so klein ist, ändert sich während dieser Prozesse die Struktur des Kathoden- und Anodenmaterials nur geringfügig – ein für die technische Realisierung sehr wichtiger Aspekt. Als Maß für die Leistungsfähigkeit einer Batterie dient die Kapazität, meist in Amperestunden pro Kilogramm (Ah/kg) angegeben; die Lithiumbatterie mit Graphitanode erreicht maximal etwa 370 Ah/kg, und dieser Wert wird durch die Anzahl der Lithiumatome pro Masse bestimmt.

Ein ganzer Zoo von Nanoröhren

Lange Zeit kannte man nur zwei Kohlenstoffmodifikationen: den harten Diamant und den Graphit mit seiner oben vorgestellten Schichtstruktur. Das änderte sich 1985 mit der Entdeckung der Fullerene (C_{60}, „Bucky-Balls") und wenig später, im Jahr 1991, mit der der Nanoröhren – so genannt wegen ihres geringen Durchmessers im Nanometerbereich. Die Wand einer Nanoröhre ähnelt einer Schicht im Graphit, denn sie besteht ebenfalls aus Kohlenstoffringen. Allerdings gibt es nicht eine einzige Nanoröhrenstruktur, sondern man findet einen ganzen Zoo: einwandige, mehrwandige, gerade und verdrillte, lange und kurze – die relativen Anteile sind jeweils abhängig von der Herstellung. Sehr bald nach der Entdeckung der Nanoröhren sah man in ihnen auch ein ideales Speichermedium, zum Beispiel für Wasserstoff, aber eben auch für Lithium-Ionen in Batterien.

Den Anfang machten die Theoretiker. Mit moleküldynamischen Methoden wurde der Einbau von Alkali-Ionen wie Li^+ und Na^+ in einwandige Nanoröhren simuliert. Die Voraussage lautete: Bündel von einwandigen Nanoröhren können mehr davon fassen als Graphit. Als theoretische Sättigungsgrenze fand man ein Verhältnis Lithium zu Kohlenstoff von 1 : 1,7, das möglicherweise wegen der Abstoßung der positiven Lithium-Ionen nicht realisierbar ist. In einem solchen Bündel sind die Lithium-Ionen nicht nur in den Nanoröhren, sondern auch dazwischen eingelagert (*Physical Review Letters, Bd. 85, Heft 8, S. 1706, 2000*).

Eine Forschergruppe an der Universität North Carolina in Chapel Hill verwendete daraufhin eine Methode des Nobelpreisträgers Richard Smalley, um Kohlenstoff-Nanoröhren herzustellen und das Prinzip weiter zu erkunden. Bei diesem Verfahren wird ein Kohlenstoffgas durch Laserbeschuss von Graphit erzeugt, aus dem sich dann mit Hilfe von Katalysatoren hauptsächlich einwandige Nanoröhren bilden. Die so erhaltenen Bündel waren über zehn Mikrometer lang und hatten einen Durchmesser von dreißig bis fünfzig Nanometer; eine einzelne Nanoröhre hatte im Schnitt 1,4 Nanometer. Nachdem die Wissenschaftler die Proben gereinigt hatten, ätzten sie einen Teil mit starker Salpetersäure und Schwefelsäure. Das ergab kürzere Röhren und bei 24-stündiger Behandlung noch dazu eine sehr enge Verteilung der Längen (0,3 bis 0,5 Mikrometer). Um das Lithium in die Bündel einzubringen, ließen sie Lithiumborhydrid mit dem Kohlenstoff der Nanoröhren reagieren. Dabei stellte sich heraus, dass die am längsten geätzte Probe besonders viel Lithium-Ionen binden konnte. Vermutlich haben die Röhrchen dort offene Enden und zusätzliche Wanddefekte (*Physical Review Letters, Bd. 88, S. 015502-1, 2002*), sodass die Ionen auch in die Röhren eindringen können.

Ähnliche Resultate werden aus dem John H. Glenn Research Center der Nasa in Cleveland (Ohio) gemeldet (www.nasatech.com/Briefs/June00/LEW16727.html). Dort wurden mit Lithium-Ionen „gefüllte" offene einwandige Nanoröhren auch schon als Anodenmaterial in Testbatterien verwendet. Die gemessene Kapazität betrug 640 Ah/kg, was fast der doppelten Kapazität von normalen mit Lithium-Ionen gefüllten Graphit-Anoden entspricht. Interessanterweise wurden jedoch für mehrwandige Röhren nur etwa 385 Ah/kg erzielt – vermutlich eine Folge von Wanddefekten, die bei einwandigen Nanoröhren sicher leichter auftreten.

Die mobilen Energiepakete der Zukunft könnten solche Winzlinge im Inneren tragen. Auch wenn damit die maximale Aufnahmefähigkeit von Kohlenstoff für Lithium-Ionen erreicht sein dürfte, fühlt man sich wieder an Richard P. Feynmans Vortragstitel erinnert: „There's plenty of room at the bottom."

Werner Gans *hat an der ETH Zürich in theoretischer Chemie promoviert. Er arbeitet als Übersetzer wissenschaftlicher Texte und koordiniert zwei Graduiertenprogramme der Freien Universität Berlin.*

TECHNOGRAMM

MATERIALWISSENSCHAFT

Auch „Rostfrei" setzt Rost frei

Rostfreier Stahl ist als Werkstoff aus Alltag und Technik nicht wegzudenken. Trotzdem kann Rost auch dem edelsten Edelstahl noch etwas anhaben. Wie das genau geschieht, haben Mary Ryan vom Imperial College und ihr Kollege David Williams vom University College in London herausgefunden. Mit einem fokussierten Ionenstrahl schlugen sie aus einer Stahlprobe Partikel heraus, die sie anschließend mit einem Massenspektrometer analysierten. Damit konnten Ryan und Williams eine chemische Landkarte der Probenoberfläche erstellen. Darauf zeigten sich gerade dort chromdioxidarme Bereiche, wo winzige Schwefelklümpchen als Verunreinigung des Eisens in den Stahl gelangt waren. Chromoxide in der Oberflächenschicht schützen das darunter liegende Metall vor Korrosion – Kratzer „heilen" wieder, weil Chrom gleichmäßig im Stahl verteilt ist und an Luft wieder Chromoxid bildet. Die nur wenige Mikrometer messenden Schwefeleinschlüsse binden jedoch das Chrom und entziehen es so der Umgebung. Damit lassen sie den Stahl an diesen Stellen verwundbar für Rost werden. Als Heilmittel schlagen die Forscher eine Hitzebehandlung vor, die das Chrom wieder in die Regionen diffundieren lässt, denen es zuvor durch den Schwefel entzogen wurde. (*Nature, Bd. 415, S. 770*)



IMPERIAL COLLEGE OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND MEDICINE, DEPARTMENT OF MATERIALS

Chromarme Regionen (Ringe) um ein Schwefel-Partikel lassen auch rostfreien Stahl rosten.

AGRARTECHNIK

EVA gegen Schädlinge

Mit kleinen Netzen aus Polymerfasern wollen Forscher dem Schädlingsbefall bei Pflanzen Paroli bieten. Michael Hoffmann von der Cornell University und seine Kollegen haben für diesen Zweck so genanntes Ethylenvinylacetat (EVA) getestet. Das Polymer, das auch in Heißklebepistolen verwendet wird, erinnert an Zuckerwatte und bildet ein Netz aus einzelnen, nicht verwobenen Fasern. Erste Freilandversuche zeigten deutliche Erfolge. Während sich an ungeschützten Zwiebelpflanzen im Durchschnitt 10,4 Eier der Zwiebelfliege fanden, beherbergten umhüllte Pflanzen nur noch etwa 1,4 Eier dieses Schädlings. Das EVA-Netz scheint die natürliche Entwicklung der Sprößlinge nicht zu behindern. Brokkoliblätter durchbrechen beispielsweise problemlos die Schutzhülle. Für einen ausgedehnten Einsatz ist die Methode allerdings noch zu teuer und zu aufwendig. Hoffmann hat jedoch schon weitere Pläne. So wäre es denkbar, eine Faser zu entwickeln, die zusätzliche Abwehrstoffe enthält, welche die Wirkung gegen Schädlinge noch steigern.



CORNELL UNIVERSITY

Ein Netz aus Ethylenvinylacetat (EVA) schützt hier eine Brokkoli-Pflanze vor Schädlingsbefall.

pes Diagnosesysteme

Schlauer Blutsensor

Alltag in einer deutschen Klinik: Ein älterer Mann wird mit starken Brustschmerzen eingeliefert, Verdacht auf Herzinfarkt. Ein EKG (Elektrokardiogramm) wird aufgenommen, erscheint aber unspektakulär. Doch das will noch nichts heißen, denn manchmal versagt diese Methode bei frisch verletztem Herzgewebe. Aussagekräftiger wäre nun eine Blutanalyse, denn das Konzentrationsverhältnis von bestimmten Proteinen ändert sich beim Infarkt. Doch nur wenige Krankenhäuser unterhalten eigene Labors, die solche Aussagen in der gebotenen Eile liefern können. Hat pes Diagnosesysteme mit seinem neuen Gerät Erfolg, werden selbst Arztpraxen bald derartige Analysen durchführen können.

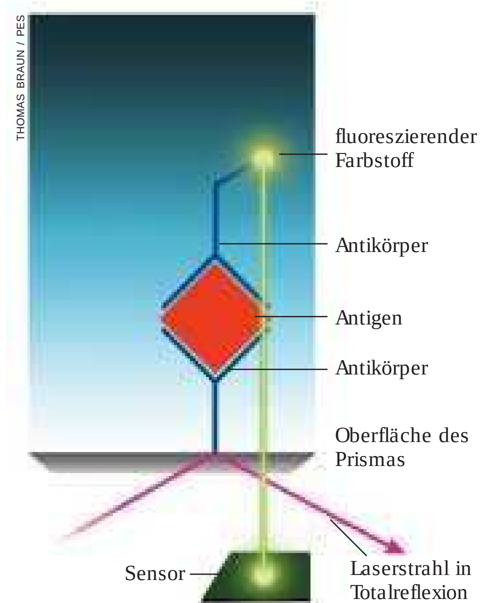
Das System basiert – wie heute bei Proteinnachweisen üblich – auf spezifischen Reaktionen zwischen Antikörpern und Antigenproteinen. Dementsprechend flexibel lässt sich das Messgerät auslegen: Je nach Antikörper kann es auch Entzündungen, Infektionen oder Tumoren anzeigen. Bis zu acht Einzelblutwerte gleichzeitig lassen sich ohne Umweg über ein Labor bestimmen. Das vereinfacht beispielsweise die Nachsorge nach Operationen und dient der Kontrolle, ob ein Medikament angeschlagen hat.

Auch für die Früherkennung von Krankheiten soll das System dienen. Der Firmengründer, Thomas Löser, hatte ursprünglich das Ziel, die Diagnose von Lungenkrebs zu verbessern. Er kombinierte eine Detektionsmethode des Instituts für Chemo- und Biosensorik (ICB) in Münster mit einem auf so genannter Fuzzy Logic basierenden Auswerteverfahren. Damit gelang es ihm, Bluttests auf acht Markerproteine miteinander zu kombinieren. Der Computer ermittelte die Wahrscheinlichkeit für einen Tumor und sogar das Entwicklungsstadium.

Allerdings hätten die Ärzte dafür die Blutprobe exakt vorbereiten und in gekühlten Spezialbehältern zu dem Unternehmen schicken müssen. Zudem wären Tage bis zum Ergebnis verstrichen. „Uns war bald klar, dass wir dem Arzt ein Gerät in die Praxis stellen müssen, um Erfolg auf dem Markt zu haben", sagt Löser heute.

Gemeinsam mit Siemens entwickelte pes Diagnosesysteme deshalb ein System, das jetzt Serienreife erlangt hat. „MultiCheck" besteht aus einem Detektionsgerät, kleiner als ein Desktop-PC, und etwa daumengroßen Einmalsensoren aus Kunststoff. Das vollautomatische Minilabor übernimmt die mechanische Steuerung, die optische Erfassung und die computergerechte Aufbereitung der Daten; in den Sensoren erfolgt die biochemische Reaktion. Zudem enthält jeder Messfühler einen Chip, der dem Gerät mitteilt, welches spezielle Programm ablaufen und wie die Auswertung erfolgen soll. Die ersten Sensoren, die nach Abschluss des laufenden Zulassungsverfahrens auf den Markt kommen sollen, messen das so genannte C-reaktive Protein (CRP), das bei Entzündungen und nach Operationen vermehrt im Blut vorkommt, sowie Markerproteine für Herzinfarkt, Prostatakrebs und Lungenentzündung.

Für eine Messung spritzt der Arzt lediglich etwas Blut in eine Öffnung des Sensors, steckt diesen in das MultiCheck und drückt die Starttaste. Dann schiebt eine kleine Pumpe das Blut über eine Membran, die rote Blutplättchen abtrennt. Knapp vier Mikroliter des verbleibenden Plasmas werden dann in eine Kammer befördert, wo eventuell vorhan-



Das Grundprinzip schneller Diagnose: Antikörper binden an ein charakteristisches Protein (Antigen), ein Farbstoff wird zur Fluoreszenz angeregt.



Herzinfarkt, ja oder nein? Maßgeschneiderte Sensoren bewältigen spezielle Bluttests in wenigen Minuten und ersparen das Großlabor.

Das Unternehmen im Profil

pes Diagnosesysteme ist eine Tochter der pe Diagnostik GmbH, beide Unternehmen beschäftigen zusammen dreißig Mitarbeiter. pes wurde im Jahr 1999 unter Beteiligung der Medizintechniksparte von Siemens (22 Prozent) und des Sächsischen Beteiligungsfonds SBF (22 Prozent) gegründet. Firmensitz ist Markkleeberg bei Leipzig. Bei Siemens erfolgte die gesamte Entwicklung des Auswertegeräts, pes fertigt die Sensoren und entwickelt die immunchemischen Testreihen. Vertreiben wird das Gerät ein Unternehmen, das auf kleine Diagnosegeräte spezialisiert ist. In Zukunft soll eine breite Palette mit Sensoren für noch mehr Laborparameter zur Verfügung stehen: etwa für die Diagnostik von Herzerkrankungen, für die Erkennung von Pneumonien und Thrombosen sowie für die Bestimmung von Entzündungsmarkern.

Weitere Informationen finden Sie unter: *www.pes-d.de*

dene Antigene mit spezifischen, farbmarkierten Antikörpern zu einem Komplex reagieren.

Die Pumpe drückt dieses Gemisch auf ein Prisma. Darauf befinden sich in parallel angeordneten Teststreifen weitere Antikörper, die Proteinkomplexe einfangen und fixieren. Jetzt scannt ein Laser das Prisma und regt die farbmarkierten Verbindungen zum Leuchten an. Dieses Fluoreszenzlicht fängt ein Detektor auf (siehe Grafik).

Die Intensität der Fluoreszenz ist ein Maß für die Konzentration an Markerprotein. Dabei wartet das System nicht, bis der Streifen vollständig belegt ist, sondern wertet bereits die Zunahme der Fluoreszenz aus, um die Endkonzentration abzuschätzen. Die gesamte Messung dauert maximal 15 Minuten. Zur Kalibrierung gegen einen Nullwert dienen Referenzstreifen auf dem Prisma.

Der pes-Chef ist damit aber noch nicht zufrieden. „Wir sollten auch Zwischenergebnisse anzeigen können, dann könnte das Gerät schon nach wenigen Minuten eine vorläufige Warnung ausspucken." Bei einem Herzinfarkt zählt schließlich jede Minute.

Norbert Aschenbrenner

Der Autor ist Wissenschaftsjournalist in München.

SICHERHEITSTECHNIK

Tunnelbrände: Wirbel für rauchfreie Zonen

Bei Tunnelbränden kann sich ein simples System als lebensrettend erweisen: Es verhindert, dass Rauch die Sicht versperrt.

Von Claus M. Schmidt

Achtlos wirft ein Autofahrer eine Zigarettenkippe aus dem Fenster. Die verwirbelten Funken setzen einen Margarine-Laster in Brand. Im darauf folgenden Flammeninferno kommen 41 Menschen ums Leben. So geschehen am 24. März 1999 im Montblanc-Tunnel zwischen Frankreich und Italien. Zwei Monate später: Nach einem Unfall brennt es im österreichischen Tauerntunnel. Zwölf Menschen sterben. Das Feuer in der Kitzsteinhornbahn vom November 2000 fordert 155 Menschenleben. Die Bilanz eines Brandes im St.-Gotthard-Tunnel am 24. Oktober 2001: elf Tote.

Jetzt fährt die Angst mit in die Röhre. Die Bilder der rauchenden Tunneleingänge und der machtlosen Rettungskräfte, die zur Untätigkeit verurteilt sind, solange sich die Gluthitze nicht abgekühlt hat, stehen vor aller Augen. Und auch die Fragen: Lassen sich solche Unglücksfälle verhindern? Wie können sich Menschen retten, die einige Kilometer tief im Berg gefangen sind?

Angesichts dieser Serie von Katastrophen versteht es sich, dass alle betroffenen Tunnelanlagen vor ihrer erneuten Inbetriebnahme nach neuesten Erkenntnissen mit zusätzlichen Sicherheitssystemen versehen werden:

➤ Gefahrguttransporte wie Tank- und Chemikalienlastkraftwagen dürfen viele Tunnel nicht mehr passieren,

➤ Geschwindigkeitsbeschränkungen sollen das Unfallrisiko senken und die Unfallfolgen mindern,

➤ einspurige Verkehrsführung in getrennten Röhren – oder per Ampel im Richtungswechsel – soll das Risiko frontaler Kollisionen ausschließen,

➤ Luftschächte und Gebläse sollen Rauch aus der Tunnelzone abziehen,

➤ Parallel- und Rettungsstollen sollen Personen die Flucht ermöglichen und der Feuerwehr Zugang zum Brandherd verschaffen,

➤ Brände sollen per Sprinkleranlage und Feuerlöschstationen vor Ort möglichst rasch eingedämmt werden,

➤ Fluchtwege werden deutlich und leuchtend markiert, damit sie auch bei Rauchentwicklung eine Orientierung ermöglichen.

All dies sind wichtige Fortschritte. Doch sie lösen nicht das fatale Problem, das in den ersten Minuten eines Tunnelbrandes die meisten Opfer fordert, sagt Wolfram Klingsch, Brandschutzexperte an der Bergischen Universität Wuppertal: Innerhalb von wenigen Sekunden füllt sich die Röhre mit dichtem Rauch, der den Menschen erst die Sicht und kurz darauf auch den Atem nimmt.

Simulierte Katastrophen

Klingsch, der die Feuersicherheits- und Fluchtsysteme für den neuen Düsseldorfer Flughafen, für Bahnhöfe und Hochhäuser entworfen hat, und sein Kollege Rüdiger Detzer von der Hamburger Ingenieurfirma Imtech Deutschland haben nun ein Konzept der aktiven Tunnelentrauchung entwickelt, das künftig viele Leben retten könnte. Denn es bietet allen Unfallbeteiligten nach dem Crash wertvolle erste Minuten, sich aus eigener Kraft in Sicherheit zu bringen.

Wie brisant das Problem der Verrauchung ist, zeigt sich im Labor. Dort können Klingsch und seine Partner eindrucksvoll das Geschehen in den ersten Minuten nach Entstehung eines Tunnelbrandes simulieren: In einer fünf Meter langen Plexiglasröhre von sechzig Zentimetern Durchmesser, die einen zweispurigen Straßentunnel nachbildet, steht ein Lkw im Maßstab 1:20. Die vom Modell ausströmende Rauchmenge kann von außen stufenlos gesteigert werden. So lässt sich vom Reifen- bis zum Vollbrand jedes Szenario unter reproduzierbaren Bedingungen simulieren.

Die Zirkulation der bei einem Tunnelbrand entstehenden Rauchpartikel folgt festen Gesetzmäßigkeiten. Vom brennenden Fahrzeug aus steigt der Rauch zusammen mit der erhitzten Luft zur Tunneldecke auf. Dort breitet er sich nach den Seiten aus und kühlt ab. Durch



IMTECH DEUTSCHLAND

Ein Lkw brennt im Tunnel. Die regenrinnenähnlichen Vorrichtungen seitlich an der Tunneldecke sorgen hier im Laborexperiment dafür, dass selbst der Bereich neben dem brennenden Fahrzeug rauchfrei bleibt.

den am Brandherd auftretenden Unterdruck entsteht ein Sog, der die Rauchmassen an den Tunnelwänden hinab führt. Bodennah strömen sie zum Brandherd zurück und steigen erneut nach oben. Mit jeder Runde heizt sich der entstehende Wirbel weiter auf und gewinnt an Tempo. Innerhalb der ersten Minute wird der Rauch im Bereich des Brandorts so dicht, dass man dort buchstäblich nicht mehr die Hand vor Augen sehen kann. Die maßstabsgetreuen Fußgängermodelle im Simulationstunnel verschwinden für den Beobachter draußen im Nu im dichten Qualm.

Ab einer Partikelkonzentration von 40 000 ppm (*parts per million*) ist die Sicht völlig blockiert. Anhand des Modellexperiments kann Klingsch die Geschwindigkeit errechnen, mit der sich eine Rauchwolke solcher Dichte vom Brandherd ausbreitet: Innerhalb von vier Minuten hat sie den Tunnel über eine Strecke von etwa 500 Metern ins Dunkel getaucht. In diesem Bereich können sich Menschen nicht mehr an Pfeilen oder Lichtsignalen orientieren. Aus eigener Kraft ist ein Entkommen durch feuersichere Türen in einen Rettungsstollen nicht mehr möglich.

In jenen kritischen ersten Minuten kommt es aber zu einer weiteren dramatischen Entwicklung, die auch jede Rettung von außen verhindert: Treibstoffe explodieren und gehen in Flammen auf. Gemeinsam mit Kunststoffen der Autoausstattung und Ladungsgütern entwickeln diese brennenden Substanzen Temperaturen von mehr als 1000 Grad Celsius und setzen toxische Gase frei. Die leidvolle Erfahrung hat gezeigt, dass es nun Tage dauern kann, bis Rettungsmannschaften zum Unglücksort vordringen können.

Das neue Konzept der aktiven Entrauchung von Klingsch und seinen Partnern sorgt dafür, dass sich der Rauchwirbel in der oberen Tunnelhälfte fängt. Mit der Verlegung des neuen Zyklon-Entrauchungssystems unter die Tunneldecke bleibt der bodennahe Fluchtweg weitgehend rauchfrei. Dadurch können sich Menschen rechtzeitig in Sicherheit bringen. Zugleich bleibt der Unfallort auch für Rettungseinsätze zugänglich.

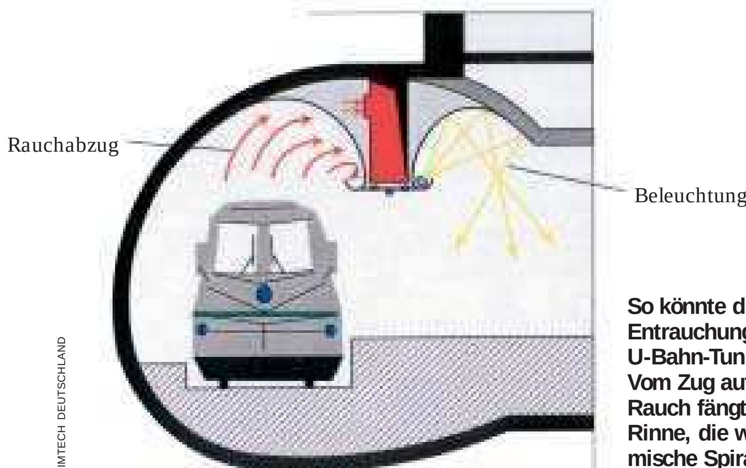


In dem Plexiglas-Tunnelmodell können vom Reifen- bis zum Vollbrand des Fahrzeugs alle brenzligen Situationen untersucht werden. Die Rinnen an der Tunneldecke stabilisieren die Drallströmung des Rauches, der durch zahlreiche senkrecht angeordnete Rohre abgeleitet wird.

Rauchentzug mit Drall

Grundlage dieser Brandraucherfassung ist eine technisch gelenkte Drallströmung. Ein solches Verfahren wird bereits seit Jahren in der Industrie genutzt, um schädliche Emissionen aus der Atemluft zu entfernen, wie sie etwa bei der Produktion von Aluminium oder beim Einsatz von flüchtigen Lösungsmitteln auftreten. Aufsteigende Rauch-, Wärme- und Dampfemissionen werden dabei oberhalb des Atembereichs mit einer Einrichtung erfasst, die einer Dachrinne ähnelt. Diese Rinne fängt die von der Decke absinkende Emission in der gewünschten Höhe auf. In ihr entsteht der Drall, ein Strömungsfeld, das mit Geschwindigkeiten bis zu 250 Kilometern pro Stunde rotiert. Im Zentrum dieses Strömungsfeldes entsteht – wie im Auge eines Wirbelsturms – ein Unterdruck. Dieser „saugt“ die Schadstoffe zum Drallzentrum und führt sie von dort über die Rinne ab.

Die aktive Tunnelentrauchung funktioniert auf die gleiche Weise. Hier leiten zwei Raucherfassungsanlagen entlang beider Tunnel-Längsseiten den Qualm und die erhitzte Luft nach draußen. Was Klingsch’ Laborversuche auf eindrucksvolle Weise demonstrieren, könnte künftig im großen Maßstab in Straßen-, Eisenbahn- und U-Bahn-Tunneln eingesetzt werden. In einigen Jahren werden wir also möglicherweise regenrinnenähnliche Gebilde unter der Tunneldecke hängen sehen. Was der Laie dann vielleicht als Auffangvorrichtung für Tropfwasser interpretieren mag, werden die Betroffenen im Fall der Fälle als effektives Lebensrettungssystem zu schätzen wissen.



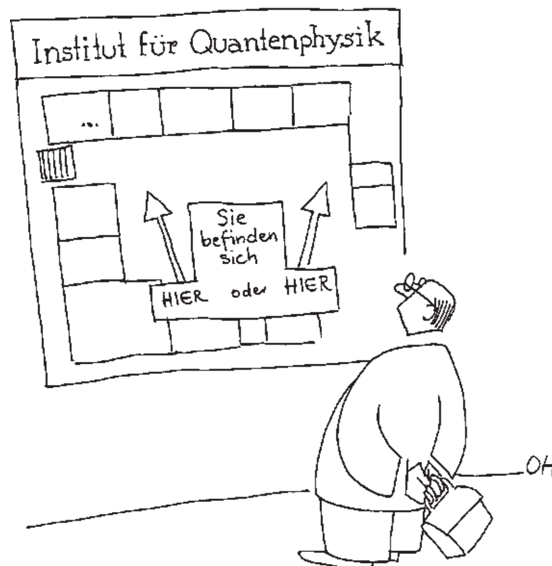
So könnte die aktive Entrauchung in einem U-Bahn-Tunnel aussehen: Vom Zug aufsteigender Rauch fängt sich in der Rinne, die wie eine logarithmische Spirale geformt ist.

Claus M. Schmidt *ist Wissenschaftsjournalist in München.*

UNIVERSITÄTS-NEUGRÜNDUNG

Privates Kind öffentlicher Eltern

Die International University Bremen hat im Herbst den Lehrbetrieb aufgenommen und zumindest vorläufig den Segen des Wissenschaftsrats erhalten.



Von Christoph Pöppe

Ausgerechnet 1997, während der Krise der Vulkan-Werft, fasste der Bremer Senat einen Beschluss zur Wirtschaftsförderung, dessen Früchte die arbeitslosen Werftarbeiter mit Sicherheit nicht mehr genießen können: Er stellte 230 Millionen Mark als Kapital zur Gründung einer privatwirtschaftlich organisierten, internationalen Universität nach amerikanischem Muster zur Verfügung. Zugleich wies er die ausgedehnten Grundstücks- und Gebäudeflächen der bisherigen Nachschubschule für Offiziersanwärter im Bremer Norden, welche die Bundeswehr kurz zuvor wegen Platzmangels geräumt hatte, nicht der (Fach-)Hochschule Bremen, sondern der neu zu gründenden Universität zu.

Zum Konzept der Universität gehören Studiengebühren und eine strenge, leistungsbezogene Auslese der Studierenden – einigermaßen überraschend in einer Stadt, in der vor wenig mehr als dreißig Jahren eine öffentlich-rechtliche Universität mit ausgesprochen egalitärem Anspruch gegründet wurde. Obendrein kommen wesentliche Impulse zur Neugründung aus eben dieser Universität Bremen: Der Mathematiker Heinz-Otto Peitgen knüpfte die Verbindung zur Rice-Universität in Houston (Texas), die daraufhin eine Art Patenschaft für die neue Universität übernahm; Jürgen Timm, Rektor der Universität Bremen, unterstützt das Projekt. Die im Februar 1999 offiziell gegründete „International University Bremen" (IUB) hat inzwischen Kooperationsabkommen sowohl mit der Rice-Universität als auch mit der öffentlich-rechtlichen großen Schwester am Ort.

Man suchte nach den leitenden Persönlichkeiten, die diese Idee einer Privat-Universität in die Realität umsetzen sollten – und fand sie im öffentlich-rechtlichen Bereich. Präsident ist nun Fritz Schaumann, den der Regierungswechsel 1998 gerade zur rechten Zeit von seinem bisherigen Posten als Staatssekretär im Bundesministerium für Forschung und Technologie befreit hatte. Die Dekane der zwei Fakultäten (*schools*) sind beide 66 Jahre alt: Gerhard Haerendel für die naturwissenschaftliche Fakultät ist langjähriger Direktor des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik in Garching; Max Kaase, der die etwa halb so große geisteswissenschaftliche Fakultät leitet, hat viele Jahre lang sozialwissenschaftliche Forschung in Mannheim betrieben und war Mitglied in entscheidenden Gremien von Wissenschaftsrat und Deutscher Forschungsgemeinschaft.

Auf der Liste der Professoren finden sich mehrheitlich deutsche Namen. Einzig der Mathematiker Raymond Wells von der Rice-Universität kann seinen Kollegen aus eigener reichhaltiger Erfahrung vom amerikanischen Universitätsalltag erzählen.



IUB

Nur die martialisch-steinernen Türrahmen an den Gebäuden der International University Bremen künden noch von deren militärischer Vergangenheit.

Jacobs Krönung: ein Studienzentrum

Bis 2005 will die IUB ihr Startkapital durch private Spenden auf 250 Millionen Euro reichlich verdoppeln. Dieses Geld soll unangetastet bleiben und nur seine Erträge den Betrieb finanzieren helfen. Wie in den USA üblich, dürfen die Spender geeigneten Teilen der Universität ihren Namen anheften. So wohnen die ersten 132 Studenten im „Alfried Krupp College"; die Krönung der Spendenakquisitionsbemühungen ist bislang das „Jacobs Center of Lifelong Learning and Institutional Development", gestiftet von der gleichnamigen Bremer Kaffeeröster-Familie, mit acht Professuren, die sich mit individueller menschlicher Entwicklung im weitesten Sinne befassen sollen.

Im Endausbau 2005 will die Universität 1200 Studenten ausbilden, davon ein Drittel *graduates*, also mit einem ersten Abschluss, und hundert Professoren beschäftigen. Die Studiengebühr beträgt stolze 15 000 Euro pro Jahr (Unterkunft auf dem Campus nicht eingeschlossen); ▶


IUB

Die Studierenden der IUB kommen aus aller Welt.

allerdings kommen von den Studierenden, die zunächst alle ohne Ansehen der finanziellen Verhältnisse ausgewählt werden, etwa zwei Drittel in den Genuss einer Ermäßigung.

Im September 2001 hat die IUB mit 29 Dozenten und 132 Studierenden den Betrieb aufgenommen. Ein Viertel der Anfänger kommt aus Deutschland, ein Drittel aus Mittel- und Osteuropa, die Herkunftsorte der Übrigen verteilen sich über die restliche Welt.

Schon zwei Monate später nahm der Wissenschaftsrat die IUB in den Kreis der deutschen Hochschulen auf, die er für förderungswürdig hält. Grundlage dieser befristeten Akkreditierung ist naturgemäß nicht die bisherige Leistung, sondern das Konzept, das der Wissenschaftsrat mit allerlei Vorschusslorbeeren versieht. Die gegenüber deutschen Universitäten fast halbierte Lehrverpflichtung lasse den Professoren reichlich Zeit zum Forschen; dafür müssen sie in der Grundausstattung ohne wissenschaftliche Mitarbeiter auskommen. Allerdings sei zweifelhaft, ob es wirklich gelingen werde, 30 Millionen Euro pro Jahr an Spenden einzuwerben.

Die Akkreditierung öffnet der IUB den Zugang zum Geldtopf des Hochschulbauförderungsgesetzes. Damit werden wie bei öffentlichen Hochschulen Bauvorhaben zu fünfzig Prozent vom Bund getragen. Die andere Hälfte muss statt vom jeweiligen Bundesland aus eigenen Mitteln der IUB kommen.

Im Gründungseifer war wenig Zeit für eine Planung der eigentlichen Lehraktivitäten geblieben. Professoren, die

Nachgehakt

Nukleare Waffen – schon vergessen?

Zu Weihnachten alarmierte ein Fax die Internationale Atomenergiebehörde in Wien: Zum dritten Mal waren in Georgien Behälter gefunden worden, die so intensive Wärme ausstrahlten, dass rundum der Schnee schmolz. Den Findern wurde bald übel, und sie entwickelten rasch alle Symptome schwerer Strahlenkrankheit.

Gegenwärtig ist ein Team der Atombehörde in Abchasien – einer unruhigen, von Separatisten mit Terror bedrohten Region Georgiens – unterwegs, um nach weiteren „heißen“ Behältern zu suchen. Jedes Gefäß enthält so viel radioaktives Strontium-90, wie bei der Tschernobyl-Katastrophe im Jahre 1986 insgesamt frei wurde. Anscheinend stellte die Sowjetunion mehrere hundert solcher Behälter her, um aus der darin erzeugten Wärme Energie für militärische Radiosender zu gewinnen. Nur einige wenige der Container wurden in Nachfolgestaaten der UdSSR sichergestellt; wo die Übrigen lagern, ist den Nuklear-Kontrolleuren ein Rätsel.

Solche Berichte tauchen zwar in Wissenschaftsjournalen auf („Science“, Bd. 295, S. 779, 1. Februar 2002), gehen aber in der alltäglichen Flut von Kriegs- und Terrormeldungen unbemerkt unter. Denn allgemein herrscht der Eindruck vor, wir hätten spätestens seit dem Zusammenbruch der Sowjetunion das Atomzeitalter endgültig hinter uns und seien nun in die Ära der Biotechnologie eingetreten – und dementsprechend ist die Öffentlichkeit höchst besorgt über Biowaffen, aber weit gelassener gegenüber der nuklearen Bedrohung.

Tatsächlich besteht die Atomgefahr weiter, sie ist nur unübersichtlicher geworden. Allein aus der Wiederaufbereitung ziviler Kernbrennstoffe haben sich bis heute 200 000 Kilogramm Plutonium angehäuft – für die Zerstörung von Nagasaki reichten sechs. Die großen Atommächte USA und Russland besitzen noch immer je 2000 nukleare Sprengköpfe, die sie auf Raketen binnen einer Viertelstunde starten können. Zwischen diesen Mächten schwelt gegenwärtig ein riskanter Konflikt wegen der amerikanischen Pläne, ein nationales Raketenabwehrsystem zu installieren.

Hinzu kommen die „mittelgroßen“ Nuklearmächte Großbritannien, Frankreich und China sowie die kleinen: Israel, Indien und Pakistan – Letztere inmitten akuter Konflikte, bei denen stillschweigend oder offen die nukleare Option mit im Spiel ist (Spektrum der Wissenschaft 2/2002, S. 92).

Wäre es nicht höchste Zeit, über den Abbau eines Vernichtungspotenzials zu reden, das nach wie vor gefährlicher ist als alle Umwelt- und Bio-Risiken zusammengenommen? Wenn es eine globale Bedrohung gibt, dann diese. Der Ausweg, den der amerikanische Physiker und Abrüstungsaktivist Richard L. Garwin und der französische Physik-Nobelpreisträger Georges Charpak skizzieren („Megawatts and Megatons“, Knopf, New York 2001), mutet so nahe liegend wie utopisch an: USA und Russland halbieren im ersten Schritt ihre atomaren Arsenale, die Mittelmächte rüsten im Zuge multilateraler Verhandlungen ab. Am Ende kontrolliert der Sicherheitsrat der Vereinten Nationen einen Restbestand von einigen hundert Nuklearwaffen.

Garwin und Charpak laufen mit solchen Ideen gewiss Gefahr, als Utopisten belächelt zu werden; doch dieses Risiko ist geringfügig gegen das, wogegen sie sich wenden.



Michael Springer

Der Autor ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

zum 1. September ihren Dienst antraten und wenige Tage später ihre erste Vorlesung zu halten hatten, müssen nun im laufenden Betrieb die sehr anspruchsvollen guten Vorsätze der Gründer einlösen. So soll die Ausbildung innerhalb von drei statt, wie in den USA üblich, vier Jahren zum *Bachelor of Science* führen, bei entsprechend verdichtetem Stundenplan. Über die daraus resultierende Arbeitslast gab es bei den Elite-Studenten der ersten Stunde bereits vernehmliches Aufstöhnen.

Gratwanderung zwischen den Disziplinen

Neben der „Exzellenz“ („nur das Beste aus beiden Welten“) hat sich die Universität „Transdisziplinarität“ auf die Fahnen geschrieben. Das soll ungefähr dasselbe sein wie Interdisziplinarität, nur ohne die Lizenz zum Dilettantismus, die sich in das übliche Verständnis dieses Wortes eingeschlichen habe.

Dieser gute Vorsatz läuft darauf hinaus, dass die Studierenden verpflichtet sind, eine erhebliche Anzahl von Kursen in anderen Fächern als dem eigenen und ein paar sogar in der jeweils anderen Fakultät zu besuchen. Gemeint ist hierbei das Standardprogramm; Schmalspurkurse nach dem andernorts praktizierten Muster „Statistik für Mediziner“ sind nicht vorgesehen. Das klingt zunächst überzeugend; nur wird ein Sozialwissenschaftler, der beispielsweise eine Anfängervorlesung in Mathematik besucht, viel Mühe um die Grundlagen aufwenden und dabei die Erweiterung seines Horizontes verpassen, denn die kommt regelmäßig erst später.

Der Mangel an Planung und Festlegung ist gleichzeitig auch eine große Gestaltungsfreiheit. Noch sind die Fachbereiche so klein, dass nur sehr wenige Leute sich auf die Einführung eines neuen Studienplans oder neuer Lehr- und Lernformen einigen müssen.

Das Baby ist zwar durch eine Art Sturzgeburt zur Welt gekommen, wirkt aber munter und kreativ. Eine gewisse liebevolle Zuwendung von Seiten der öffentlich-rechtlichen Tanten (unter denen es wie üblich auch missgünstige gibt) wird erforderlich sein. Erst wenn der neben dem Universitätsgelände geplante Technologiepark auflebt und es gelingt, Absolventen der IUB in der Region zu halten, wird der vom Bremer Senat angestrebte positive Effekt für die Wirtschaft der Stadt eintreten.

Christoph Pöppe *ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*

HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT DEUTSCHER FORSCHUNGSZENTREN

Großforschungseinrichtungen mit neuer Strategie

Kooperation und Wettbewerb sollen die Helmholtz-Zentren effektiver machen. Für den Teilbereich der Gesundheitsforschung zeichnet sich eine neue Organisation ab.

Von G. Hartmut Altenmüller

Die Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) ist die größte Wissenschaftsorganisation in Deutschland. Rund 24000 Mitarbeiter in 15 Einrichtungen erforschen Themen von nationalem und gesellschaftlichem Interesse: Gesundheit, Erde und Umwelt, Energie, Weltraum und Verkehr, Struktur der Materie sowie mehrere Schlüsseltechnologien.

Die früher als Großforschungszentren bekannten Einrichtungen waren bisher nur locker in der HGF verbunden. Selbstverständnis, Finanzierung und politische Steuerung blieben auf die einzelnen Zentren konzentriert. So bemängelte denn auch der Wissenschaftsrat, das Potenzial der HGF werde bei weitem nicht ausgenutzt (siehe Spektrum der Wissenschaft, 1/2001, S. 96).

Das soll nun anders werden. Unter dem Motto „Die Stärke konzertierter Forschung“ zwingt eine strategische Neuorientierung die Zentren zum Wettbewerb und zur fachlichen Kooperation. Die staatlichen Mittel werden künftig nicht mehr jedem Zentrum einzeln, sondern pauschal der HGF bewilligt, die seit kurzem als eingetragener Verein firmiert. Die „Zuwendungsgeber“ (Bund und beteiligte Länder) legen nur noch die Struktur der Forschungsbereiche, zeitliche Budgetrahmen und Bewertungskriterien sowie allgemeine Ziele fest.

Streitpunkt Programmsteuerung

Es bleibt so den Zentren vorbehalten, die Fachprogramme auszuarbeiten. Der HGF-Senat und externe Experten bewerten sie und geben Empfehlungen an den neuen Ausschuss der Zuwendungsgeber, der die Mittel dann den Zentren zuweist. Das Management dieses Prozesses liegt bei dem neuen Präsidenten der HGF e.V., Walter Kröll. Der Physiker leitete zuvor das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und war bereits von 1991 bis 1993 Vorsitzender der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen, der Vorgänger-Organisation der HGF.

Viele Wissenschaftler innerhalb der HGF hatten sich deutlich gegen eine zentralisierende Programmförderung ausgesprochen: Sie fürchteten um ihre Autonomie. Dabei übersahen sie freilich, dass Bund und Länder nicht mehr in jedes einzelne Zentrum steuernd eingreifen dürfen. Vielmehr werde sich der Ausschuss der Zuwendungsgeber auf globale Vorgaben beschränken, versicherte Bundesforschungsministerin Edelgard Bulmahn. Allerdings musste ihr Ministerium in einem Punkt nachgeben: Grundlagenforschung bleibt weiterhin eine wichtige Aufgabe der HGF-Zentren.

Die HGF wird auch in der Öffentlichkeit mehr von sich reden machen. Dazu muss die Bonner Geschäftsstelle neue Kommunikationsstrategien entwickeln. Bisher war die Öffentlichkeitsarbeit den einzelnen Zentren vorbehalten. Zudem sieht Kröll in der europäischen Kooperation ein „prägendes Strukturelement“ der neuen HGF: „Wir wollen die Helmholtz-Gemeinschaft zu einem tragenden Pfeiler des europäischen Forschungsraumes und einem weltweit anerkannten Markenzeichen machen.“

Eine besondere Rolle werden künftig jene Helmholtz-Zentren spielen, die sich der Gesundheitsforschung widmen. Der Leiter des Deutschen Krebsforschungszentrums in Heidelberg, Harald zur Hausen, hatte schon früher vorgeschlagen, die biomedizinischen Forschungseinrichtungen der HGF mit denen der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz zu einer selbstständigen nationalen Organisation zusammenzufassen (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2001, S. 94). Diese Deutschen Zentren für Gesundheitsforschung (DZG) sollten den amerikanischen National Institutes of Health entsprechen. Der Vermutung, mit der Neuordnung der HGF sei dieser Gedanke jetzt vom Tisch, widersprachen sowohl Bulmahn als auch Kröll: Es sei „erklärtes Ziel“ der HGF, für die Gesundheitsforschung neue Organisationsstrukturen zu finden.

Das Ergebnis könnte freilich eine von der HGF losgelöste Organisation sein. Im Rahmen der bisherigen Verbundstrukturen innerhalb der HGF jedenfalls seien fachliche Koordination und einheitliche Bewertungskontrolle nicht zu leisten, meint zur Hausen. Die DZG sollen sich auf Kernaufgaben konzentrieren und Doppelforschung vermeiden, Forschungsziele von besonders hoher Komplexität interdisziplinär und langfristig bearbeiten, über einen Vernetzungsfonds Querschnittsthemen kooperativ bearbeiten und eng an universitäre Institute, besonders Kliniken, angebunden sein. Damit erhalte Gesundheitsforschung ein einheitliches Profil.



ULRICH SCHWENN

„Die Stärke konzertierter Forschung“ – Fantasiebild oder richtungsweisende Strategie?

G. Hartmut Altenmüller *ist Bonner Korrespondent von Spektrum der Wissenschaft.*

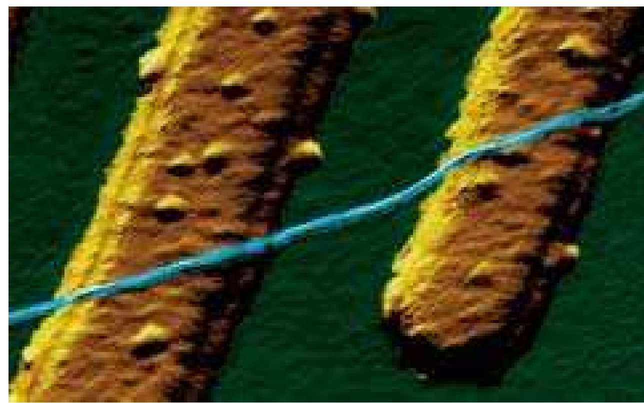
JULIUS-SPRINGER-PREIS

Molekulare Elektronik mit Nanoröhren

Seitdem der japanische Physiker Sumio Iijima 1991 so genannte Nanoröhren entdeckt hat, ist die Physik um ein interessantes Forschungsgebiet reicher. Diese Gebilde sind röhrenförmige Makromoleküle aus reinem Kohlenstoff, die nur rund einen Nanometer dick, aber mehrere tausend Nanometer lang sein können. Ihre mechanischen Eigenschaften sind faszinierend: Nanoröhren sind fester als Stahl, äußerst elastisch und hitzebeständig.


Cees Dekker

Die ersten Anwendungen von Nanoröhren haben sich jedoch durch ihre elektrischen Eigenschaften ergeben. 1997 gelang es dem niederländischen Physiker Cees Dekker mit seiner Arbeitsgruppe an der Technischen Universität Delft zum ersten Mal, den Stromfluss durch eine einzelne Nanoröhre zu messen. Seine nachfolgenden Arbeiten legten die Grundlagen, um die fadenähnlichen Kohlenstoff-Makromoleküle in winzigen Schaltkreisen als Stromleiter einsetzen zu können. Dadurch wird erheblich Platz auf den Mikrochips eingespart. Dies wiederum erlaubt, die Packungsdichte für elektronische Bauelemente zu erhöhen und die Schaltzeiten zu verkürzen. Der damit verbundene technische Durchbruch ist von ähnlicher Bedeutung wie die Einführung des Transistors vor einem halben Jahrhundert, der schließlich die Röhrentechnologie ersetzte.


CEES DEKKER, TECHNISCHE UNIVERSITÄT DELFT

Fadenförmige Kohlenstoff-Makromoleküle (blau) können als elektrische Verbindungen in Mikrochips eingesetzt werden.

Für seine Entdeckung der elektrischen Eigenschaften von Nanoröhren und seine Pionierleistungen für ihren Einsatz in molekularen Schaltkreisen erhält Dekker nun den Julius-Springer-Preis für Angewandte Physik. Diese Auszeichnung verleihen die Herausgeber der Fachzeitschriften „Applied Physics A“ und „Applied Physics B“ seit 1998. Das Preisgeld beträgt 5000 US-Dollar. Geehrt werden Wissenschaftler, die herausragende und innovative Beiträge in der Angewandten Physik geleistet haben.

Cees Dekker promovierte 1988 in Experimentalphysik an der Universität Utrecht und forscht seit 1993 an der Technischen Universität Delft, wo er seit zwei Jahren auch einen Lehrstuhl für Molekulare Biophysik innehat.

JOHANN-GEORG-ZIMMERMANN-PREIS

Wärme gegen Tumoren

Johann Georg Zimmermann (1728–1795), Leibarzt von König Georg III., ist der Namengeber einer der ältesten medizinischen Auszeichnungen in Deutschland. Der diesjährige Preisträger ist Michael Bamberg, seit 1988 Leiter der Klinik für Radioonkologie an der Universität Tübingen. Der 1972 von der Deutschen Hypothekenbank gestiftete Preis ist mit 15 000 Euro ausgestattet und wird jährlich vergeben.

Der Mediziner Bamberg erhält die Auszeichnung für seine besonderen Verdienste um die Strahlentherapie bei Tumoren. Er hat die Ergebnisse der eigenen Grundlagenforschung in äußerst wirksame Behandlungskonzepte umgesetzt. So entwickelte er eine Standardtherapie bei bestimmten Hodentumoren, bei der es sogar gelang, die Zeugungsfähigkeit von Erkrankten zu erhalten.

Eine besondere Bedeutung hat dabei die so genannte Hyperthermie, eine Therapie, bei der Krebszellen durch eine gezielte Erwärmung des Gewebes auf Temperaturen ab etwa 40,5 Grad Celsius zerstört werden – etwa durch Radio- oder Ultraschallwellen. Dass Tumorzellen durch Wärme abgetötet oder in ihrem Wachstum gehemmt werden können, ist im Prinzip schon seit längerem bekannt. So beobachtete man, wie sich Tumoren nach Erkrankungen mit hohem Fieber spontan verkleinerten. Gezielte Wärme zerstört Krebszellen, indem sie die Eiweißstrukturen im kranken Gewebe verändert oder den Stoffwechsel so beeinflusst, dass die Tumoren übersäuern und absterben, weil bestimmte Stoffwechselprodukte dort nicht mehr abtransportiert werden können. Die Nebenwirkungen sind dabei – vor allem im Vergleich zu aggressiveren Methoden wie der Chemotherapie – für die meisten Patienten gering; Komplikationen drohen jedoch, wenn Implantate wie Herzschrittmacher oder künstliche Gelenke im Spiel sind.

Auch wenn das Prinzip der Hyperthermie recht einfach klingt, erfordert ihr Einsatz höchst komplizierte Technik und ausgefeilte Methoden, denn es genügt nicht, das Gewebe einfach nur zu erwärmen. Es gilt vielmehr die erhöhte Temperatur gleichmäßig auf das Zielvolumen zu verteilen. Für den Behandlungserfolg ist es deshalb entscheidend, dass sich die Temperatur in der gesamten Behandlungsregion präzise messen und kontrollieren lässt. Dies zu optimieren ist ein Schwerpunkt von Bambergs Forschungen. Er befasst sich außerdem mit der biologischen Wirkung ionisierender Strahlung auf Tumor- und Normalgewebe, hochpräzisen computergesteuerten Verfahren in der Strahlentherapie und dem Zusammenwirken chemischer Substanzen mit der Bestrahlung. Denn Hyperthermie wird nicht nur allein, sondern auch in Kombination mit anderen Therapien eingesetzt. Dabei erweist es sich als Vorteil, dass vor allem diejenigen Krebszellen bei Hitze absterben, die am wenigsten strahlenempfindlich sind. Hyperthermie und Therapie mit Röntgenstrahlen ergänzen sich so sinnvoll. Des Weiteren lässt der Wärmeeinfluss die Zellmembranen durchlässiger für Chemotherapeutika werden.


MHH

Michael Bamberg

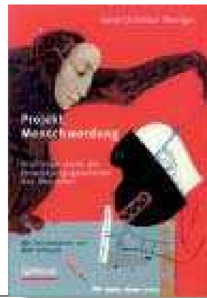
PALÄOANTHROPOLOGIE

Gerd-Christian Weniger

Projekt Menschwerdung

Streifzüge durch die Entwicklungsgeschichte des Menschen

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2001. 168 Seiten, € 19,95



Es gibt schon so viele aktuelle und mehr oder weniger umfangreiche Abhandlungen über die Entstehung des Menschen. Muss es zu diesem Thema noch ein weiteres Werk geben?

Bereits die ersten Seiten der Lektüre wischen diese Bedenken beiseite. Gerd-Christian Weniger, Direktor des Neanderthal Museums in Mettmann bei Düsseldorf, bringt sehr umfassend und auf verständliche Weise Ergebnisse aus verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen, um ein breit gefächertes Bild der biologischen wie auch der kulturellen und gesellschaftlichen Entwicklung des Menschen von ihren Anfängen bis in die Gegenwart zu präsentieren. Die Erklärung unseres Daseins „aus der Millionen von Jahren andauernden Interaktion zwischen biologischem Erbe und kultureller Innovation“ zieht sich wie ein roter Faden durch das Buch.

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Archäologen, Paläontologen, Ethnologen, Verhaltens- und Sprachforschern und seit einigen Jahren auch Molekularbiologen vermehrt ständig unser Wissen über unsere Herkunft. Doch trotz dieser Fortschritte sind die untersuchten Zeiträume immer noch immens und die Belege dünn gesät: „Für die Rekonstruktion von jeweils hundert Generationen schafft es die Paläoanthropologie, mit weniger als einem Individuum auszukommen.“ Dadurch bleiben zwangsläufig viele Fragen offen. Neben der in Jahrmillionen entstandenen typisch menschlichen Skelettmorphologie und den sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur Fortbewegung und zum Werkzeuggebrauch war es vor allem die Herausbildung besonderer kognitiver und kultureller Fähigkeiten, die unserer Art im Laufe ihrer Evolution einen so unvergleichlichen Vorteil gegenüber allen anderen Lebewesen verschafft hat.

In den fünf Hauptkapiteln „Leben und Überleben“, „Mythos und Religion“, „Werkzeug und Wissen“, „Umwelt und Ernährung“, „Verständigung und Verträglichkeit“ fasst der Autor die Leitthemen der menschlichen Evolution zusammen. Betrachtet man das vorläufige Ergebnis dieser biologischen und kulturellen Entwicklung, so wird deutlich: Wir leben auch heute noch (wenn auch oft unbewusst) von den Erfahrungen und Errungenschaften vergangener Jahrtausende. Weit zurückliegende Phasen unserer kulturellen Entwicklung sind keine abgeschlossenen Kapitel. Unser heutiges Denken und Handeln ist untrennbar mit diesen Wurzeln verbunden. Ein Beispiel hierfür ist die Rückbesinnung auf die sozialen Prinzipien des Zusammenlebens von oftmals auch als „primitiv“ bezeichneten Gesellschaften: Inzwischen sind „soziale Gleichheit, Individualität und Mobilität – der Dreiklang des politischen Systems der Jäger und Sammler – … allgemeine politische Forderungen und vielfach bereits reale Bedingungen in den demokratischen Gesellschaften der Gegenwart“.

In gewisser Weise ist die Existenz des anatomisch modernen Menschen auch das Ergebnis einer Vielzahl von Glücksfällen und Zufälligkeiten, die sich im Laufe seiner stammesgeschichtlichen Entwicklung ereignet haben. Die Wege der Evolution verlaufen nicht konstant und schon gar nicht zielgerichtet, und: Sie ist noch nicht zu Ende. Unsere biologische und kulturelle Evolution geht mit ungewissem Ausgang weiter.

„Wir Menschen verfügen über ein umfangreiches Verhaltensrepertoire zur Herstellung sozialer Beziehungen und zur Kontaktpflege mit anderen Menschen.“ Illustration von Wolf Erlbruch

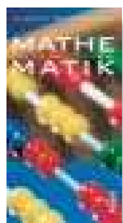


Auch wenn wir uns im Laufe der Entwicklung zum *Homo sapiens* durch unsere einzigartige Kulturfähigkeit einen immer eigenständigeren Mikrokosmos innerhalb unserer natürlichen Umwelt schaffen konnten, sind wir dennoch nach wie vor ein fester Bestandteil dieser Umwelt. Wir können als global präsente Spezies in Zukunft wohl nur dann erfolgreich bestehen, „wenn wir den Menschen als ein Projekt (der Evolution) begreifen, an dem er selber mitarbeiten muss“.

Die umfassenden und breit angelegten Ausführungen zum Thema biologische und kulturelle Evolution auf vergleichsweise wenigen Seiten werden jeden Interessierten überzeugen.

Michael Scholz

Der Rezensent ist promovierter Urgeschichtler und als freier Mitarbeiter für Spektrum der Wissenschaft tätig.



MATHEMATIK

Albrecht Beutelspacher

Mathematik für die Westentasche

Von Abakus bis Zufall

Piper, München 2001. 114 Seiten, € 9,90

Einen mathematischen Vorspeisenteller hatte sich die im Vorwort zitierte junge Dame gewünscht: Schon die richtige Mathematik. „Natürlich nicht so doll. Aber immer mal wieder. So, wie im Radio zwischen zwei Musiktiteln.“

Daraufhin hat Albrecht Beutelspacher, Mathematikprofessor in Gießen und Initiator des im Entstehen begriffenen Mathematikmuseums, immerhin reichlich fünfzig mathematische *antipasti* angerichtet: leicht, schmackhaft und in jeweils drei Minuten konsumierbar. Ist 0,999… = 1? Die Antwort ist ja, Beutelspacher gibt sie auf zwei Seiten im Westentaschenformat und meidet das Wort „Grenzwert“ nicht.

„Keine Voraussetzungen diskutieren. Und keine Beweise.“ Also auch keine Definition des Grenzwerts, keine Epsilon-Argumentationen und so weiter. Es geht, auch wenn es den Autor als echten Mathematiker (offen eingestandene) Überwindung gekostet hat.

Die Vorspeise soll Appetit auf die richtige Hauptmahlzeit wecken, sagt der Autor. Na ja – denkbar wär's schon.

Christoph Pöppe

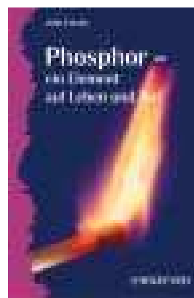
Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

CHEMIE

John Emsley

Phosphor – ein Element auf Leben und Tod

Aus dem Englischen von Anna Schleitzer.
Wiley-VCH, Weinheim 2001. 320 Seiten, € 24,90



John Emsley, Professor am King's College in London und Autor zahlreicher Sachbücher, hat für sein neuestes populärwissenschaftliches Buch ein ungewöhnliches Thema gewählt: ein einziges chemisches Element, und zwar den lange Zeit gefürchteten Phosphor. Der Autor hat selbst über sämtliche Eigenschaften des Phosphors gearbeitet und sein Wissen in eine 1992 ausgestrahlte Fernsehserie der BBC eingebracht, die mit dem Glaxo Award ausgezeichnet wurde. Das umfassende Wissen und die Darstellungskunst des Autors sind auch im vorliegenden Buch zu spüren. Emsley ordnet den Stoff nicht nach Lehrbuchkriterien, sondern eher nach der Geschichte und bestimmten Themenkomplexen wie Magie oder Umwelt. Insgesamt setzt er dem gegenwärtig miserablen Ruf der Chemie ein faszinierendes Panoptikum entgegen.

Ausgerechnet eine Halbwissenschaft des finsteren Mittelalters, die Alchemie, hat die Grundlagen für die exakte Naturwissenschaft Chemie gelegt. Die Geschichte der Darstellung des Phosphors gibt dafür ein eindrucksvolles Beispiel. Während des Mittelalters war elementarer Phosphor, der in der Natur praktisch nicht vorkommt, als „leuchtendes Element" von den Alchemisten so begehrt, dass sie ihre Herstellungsmethoden um jeden Preis geheim hielten. So sind die Geschichten der Alchemisten Hennig Brandt, Johann Kunckel und Daniel Kraft, die allesamt im späten 17. Jahrhundert die Gewinnung von Phosphor aus Urin entwickelten, geprägt von persönlichen Eitelkeiten und Geheimhalterei. Erst mit einem Brief von Robert Boyle (1627–1691), einem der Gründerväter der modernen Chemie, in dem es um die Herstellung des Phosphors geht und der erst nach Boyles Tod veröffentlicht werden durfte, beginnt dessen Untersuchung nach wissenschaftlichen Maßstäben.

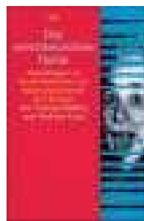
Mit einem Sprung geht Emsley dann zu der Rolle des Phosphors im Gesundheitsbereich über. Der Iatrochemie des Paracelsus zufolge gibt es für jede Krankheit eine bestimmte Ursache und daher ein bestimmtes chemisches Heilmittel. Auf den Grundzügen dieser Lehre aufbauend wurde auch ein für Menschen so giftiger Stoff wie der Phosphor über Jahrhunderte als Heilmittel für verschiedene Krankheiten eingesetzt. Der deutsche Apotheker Johann Lincke (1675–1735) verkaufte seine von einer Oxidschicht geschützten Phosphorkügelchen unter dem Namen „Kunckelpillen" als Mittel gegen Koliken, Schlaganfälle, Wundstarrkrampf und asthmatische Beschwerden.

Wer erstmals Phosphor für Zündhölzer verwendete, ist umstritten. Wahrscheinlich war es der junge französische Chemiestudent Charles Sauria 1830/31, der dafür erst ein halbes Jahrhundert später durch die Regierung seines Landes mit einer Medaille geehrt wurde. Patentiert wurden die Zündhölzer erstmals 1836 in den USA. Damals wurden sie als Congreve-Hölzer bezeichnet, weil sie so glühten wie die Raketen des britischen Waffenherstellers William Congreve. Entscheidend war die Zusammensetzung der Zündmasse aus weißem Phosphor, Schwefel, Kaliumchlorat und anderen Stoffen; deswegen wurden diese Geheimnisse vom jeweiligen Hersteller sehr gut gehütet. Schnell wurden verschiedene Zündmittel entwickelt, und zur Waffenherstellung war es dann nicht mehr weit. Dieser dunklen Seite des Elements, das vor allem in den beiden Welkriegen viel Leid angerichtet hat, sind denn auch drei Kapitel des Buches gewidmet.

Zum Schluss dreht sich alles um die Beziehung zwischen Phosphor und der Umwelt: Phosphordünger und -waschmittel, den Phosphorgehalt von Nahrungsmitteln und die Rolle dieses Stoffes bei der Eutrophierung von Seen. Dabei erfährt man unter anderem, dass die Salze der Phosphorsäure weit verbreitete Nahrungsmittelzusätze sind und vor allem bei der Käseherstellung als Emulgatoren Verwendung finden. Die Bemühungen zur Rückgewinnung von Phosphor machen große Fortschritte: „Eines nicht allzu fernen Tages wird das Phosphat, das wir mit den Speisen verzehrt haben, im Geschirrspülerpulver wieder auftauchen, an- ▶



Eine Phosphorgranate explodiert.



PHYSIKGESCHICHTE

Thomas Bührke und Andreas Loos

Das verschwundene Genie

Rätselfragen zu Persönlichkeiten aus Wissenschaft und Technik

Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2002. 190 Seiten, € 10,–

Dieses Buch versammelt biografische Rätselgeschichten, die zum größten Teil bereits in der Zeitschrift „Physik in unserer Zeit" veröffentlicht wurden. In einer ausgewogenen Mischung aus Anekdoten und physikalischen Erklärungen verrätseln die Autoren das Leben von 44 Persönlichkeiten aus dem weiten Feld der Physik, von der Antike bis zum Ende des 20. Jahrhunderts. Wer sich etwas besser in der Physikgeschichte auskennt, wird sich viele Rätsel sicher etwas „rätselhafter" wünschen. Auch findet sich in den Geschichten durchaus das eine oder andere Klischee. Etwa, dass Physiker nichts für die Künste übrig hätten. Die Autoren erwähnen zwar Richard Feynmans Vorliebe fürs Bongo-Trommeln, verschweigen aber, dass er auch gerne gezeichnet und gemalt hat. Sowas ist bei der gebotenen Kürze verzeihlich, aber nicht, dass es keinen einzigen weiterführenden Literaturhinweis gibt. Schade, denn die Geschichten unterhalten ja nicht nur, sondern machen auch neugierig.

Alexander Pawlak

Der Rezensent ist Diplom-Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Marburg.



5×5 Test® Sachbuch Top Ten April 2002

Die Sachbuch-Rezensionen von wissenschaft-online (http://www.5x5test.de) enthalten eine Punktwertung: Für die Kriterien Inhalt, Vermittlung, Verständlichkeit, Lesespaß und Preis-Leistungsverhältnis vergibt der Rezensent jeweils bis zu fünf Punkte. Die Liste führt die zehn Bücher mit den höchsten Gesamtpunktzahlen auf (Erscheinungszeitraum der Rezensionen: 21. Januar 2001 bis 1. April 2002).

1. **Tom Standage** — 23 Punkte
   Die Akte Neptun
   Die abenteuerliche Geschichte der Entdeckung des 8. Planeten
   Campus, 234 Seiten, € 21,50
2. **John Emsley** — 23
   Phosphor – ein Element auf Leben und Tod
   Wiley-VCH, 320 Seiten, € 24,90
3. **Christian Moullec** — 23
   Mit den wilden Gänsen fliegen
   Franckh-Kosmos, 121 Seiten, € 29,90
4. **J. P. McEvoy** — 22
   Sonnenfinsternis
   Die Geschichte eines Aufsehen erregenden Phänomens
   Berlin-Verlag, 255 Seiten, € 19,00
5. **Philip Ball** — 21
   H_2O. Biographie des Wassers
   Piper, 476 Seiten, € 22,90
6. **Nicholas Wade** — 21
   Das Genom-Projekt und die Neue Medizin
   Siedler, 222 Seiten, € 18,00
7. **Hans Melderis** — 20
   Geheimnis der Gene
   Die Geschichte ihrer Entschlüsselung
   Europäische Verlagsanstalt, 192 Seiten, € 19,50
8. **Hans Lenk** — 19
   Kleine Philosophie des Gehirns
   Primus, 160 Seiten, € 14,90
9. **J. Fried, J. Süßmann (Hg.)** — 18
   Revolutionen des Wissens
   C. H. Beck, 192 Seiten, € 9,90
10. **Carl-Albrecht von Treuenfels** — 18
    Tierwelten
    DVA, 400 Seiten, € 49,80

schließend werden wir damit die Tischdecken waschen, unsere Zähne putzen und so weiter – ad infinitum.“

Emsley spricht mit seinen vielen interessanten Einzelheiten und unzähligen Anekdoten sowie den Informationskästen über Hintergründe ein breites Publikum an. Ausführliche Quellenangaben zu jedem Kapitel und ein Sachregister befriedigen weiter gehenden Informationsbedarf. Insgesamt ein sehr schönes Buch.

Markus Mathys

Der Rezensent studiert interdisziplinäre Naturwissenschaften an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich.

MATHEMATIK

Keith Devlin

Das Mathe-Gen

oder wie sich das mathematische Denken entwickelt + warum Sie Zahlen ruhig vergessen können

Aus dem Amerikanischen von Dietmar Zimmer.
Klett-Cotta, Stuttgart 2001. 359 Seiten, € 22,50



Wenn es ein Gen für Mathematik-Begabung gäbe, würden die vielen Menschen, denen Mathematik eine Quälerei ist, das vielleicht als Trost empfinden. Dann wären sie ja nicht selbst für ihre schlechten Noten verantwortlich …

Pech gehabt, sagt der Mathematiker, Wissenschaftsjournalist und Sachbuchautor Keith Devlin. Es gibt nämlich gar kein Mathe-Gen. Die Eigenschaften, die den Menschen zum Betreiben von Mathematik befähigen, sind dieselben, die ihm auch Sprechen und abstraktes Denken ermöglichen. Ohne Sprache keine Mathematik.

Zur Begründung führt er den Leser auf eine Gedankenreise durch Mathematik, Sprachwissenschaft und Evolutionstheorie. Auf der ersten Station dieser Reise fasst er zusammen, was er bereits in „Muster der Mathematik“ (Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1998) ausgebreitet hat: Mathematik ist die Wissenschaft von den Mustern – realen oder vorgestellten. Es kann sich um geometrische, logische oder auch grammatische Muster handeln. In einem eigenen Kapitel erläutert Devlin das mit Beispielen aus Geometrie und Gruppentheorie.

Zahlen sind nur ein Aspekt unter vielen, und Mathematik beginnt erst da, wo der Zahlensinn aufhört. Darauf bezieht sich der zweite Teil des Untertitels. Und da für Devlin das menschliche Gehirn keine Rechenmaschine ist, sondern ein Apparat zur Mustererkennung, ist es bestens für die Beschäftigung mit Mathematik geeignet. Professionelle Mathematiker denken zwar zweifellos anders als andere Menschen, aber sie haben keine anderen Gehirne.

Numerische und algorithmische Kompetenz, die Fähigkeit zu abstrahieren und Bezüge herzustellen, der Sinn für Ursache und Wirkung und damit die Fähigkeit, eine längere Kausalkette zu konstruieren und zu verfolgen, logisches Denken und räumliches Vorstellungsvermögen sind nach Devlin die Fähigkeiten, die den Menschen in die Lage versetzen, Mathematik zu betreiben. Lässt man den ersten und den letzten Punkt dieser Aufzählung fort, dann wird klar, wie Devlin zu seiner Kernaussage von der gemeinsamen Wurzel von Mathematik und Sprache gelangt.

offline-Denken

Dazu zitiert Devlin ausgiebig Fachleute auf den Gebieten der biologischen und der Sprachevolution und gibt dann seine eigene Interpretation, die von den Erkenntnissen der Fachleute nicht gerade erzwungen, aber doch plausibel gemacht wird. Sprache ist für ihn mehr als bloße Kommunikation. Im Gegensatz zu Protosprachen wie dem – durchaus Information vermittelnden – Schwänzeltanz der Bienen hat sie eine Struktur, eine Grammatik. Nach den Forschungsergebnissen des Linguisten Noam Chomsky und seiner Nachfolger ist die Grundstruktur dieser Grammatik in allen menschlichen Sprachen im Wesentlichen dieselbe. Damit ist belegt, dass allen Menschen eine Fähigkeit zur Musterbildung gemeinsam ist – und damit auch eine Fähigkeit zur Mathematik.

Devlin geht noch einen Schritt weiter. Im Gegensatz zur gängigen Ansicht sei Kommunikation nicht die evolutionäre Triebkraft der Entwicklung zur grammatisch strukturierten Sprache, sondern deren Neben- oder Folgeeffekt, ein „Nebenprodukt der Fähigkeit unserer Urahnen, die Welt, in der sie lebten, mehr und mehr zu verstehen – sowohl ihre physische Umgebung als auch ihre zunehmend komplexer werdende soziale Welt“.

Der entscheidende Entwicklungsschritt zum Verstehen der Welt ist in seinen Augen die Fähigkeit zum „offline-

Denken“. Gemeint ist die Fähigkeit, äußere Reize zu simulieren, sich eine Vorstellung von – etwa – einem Mammut zu machen, ohne es leibhaftig vor Augen zu haben. In der Folge kann das Gehirn Strukturen, insbesondere eine Grammatik, in der Vorstellung selbst bilden.

An diesem Punkt der Evolution trennen sich die Wege von Mensch und Tier, und es taucht die Frage auf, wieso der Mensch als einziges Tier diesen Weg gegangen ist. Zunächst stellen ein großes Gehirn und die Fähigkeit des offline-Denkens keinen besonderen Selektionsvorteil dar. Erst als diese Fähigkeit innerhalb einer evolutionsgeschichtlich kurzen Zeitspanne vor ungefähr 200 000 bis 75 000 Jahren zur Bildung von Sprache und zu komplexeren Denkstrukturen führte, begann der Mensch die Welt zu erobern.

Zum Schluss bezieht Devlin seine Interpretation der Sprachevolution auf die Frage, worin sich in Mathematik erfolgreiche Menschen von den erfolglosen unterscheiden. Worüber kommunizieren Menschen am meisten? Nach Devlin sind es Klatsch und Tratsch. Wo liegt hier der Selektionsvorteil? Dem Klatsch liegt ein Interesse am Mitmenschen zu Grunde. Er trägt zum Zusammenhalt der Gruppe bei und war daher ein Überlebensvorteil. Wer ist erfolgreich in Mathematik? Derjenige, der sich für Beziehungen zwischen mathematischen Strukturen interessiert und darüber klatscht. So wie sich andere für die Fußball-Bundesliga interessieren und die Spielergebnisse der letzten zehn Jahre auswendig wissen. Jeder besitzt im Prinzip die gleiche Fähigkeit, Mathematik zu betreiben, wie auch fast jeder an einem Marathonlauf teilzunehmen fähig ist. Entscheidend ist, ob man es will.

Dieses nach über 350 Seiten überraschend simple Ergebnis erinnert stark an das amerikanische Glaubensbekenntnis, dass man den Erfolg nur wollen muss. Und genau das hat sich der geplagte Mathematiklehrer, mit desinteressierten Schülern konfrontiert, eigentlich schon immer gedacht.

Der eigentliche Gewinn beim Lesen dieses Buches liegt woanders: Man erfährt sehr viel über die Entwicklung des menschlichen Gehirns und seiner Fähigkeit, zu denken und Sprache zu entwickeln. Darüber hinaus lernt man eine originelle Interpretation bekannter Tatsachen der menschlichen Evolution kennen. Dieses Buch bietet mehr, als der Titel verspricht.

Stefan Welke

Der Rezensent ist Diplom-Mathematiker und unterrichtet Mathematik und Informatik an einem Bonner Gymnasium.

ESSAY

Die unheimliche Macht der Bilder

Nicht die Fakten, sondern unsere Vorstellungen von ihnen bewegen die Welt. – Der Autor fasst sein eigenes Buch zusammen.

Von Martin Urban



Vor knapp zweitausend Jahren lebte im römischen Reich der von seinem Besitzer freigelassene Sklave Epiktetos, auch Epiktet genannt. Er hat die Erkenntnis formuliert: „Nicht die Dinge selbst beunruhigen die Menschen, sondern ihre Urteile und Meinungen über sie.“ Nicht die Fakten sind es, die uns bewegen, sondern die Bilder, die wir uns von ihnen machen. Epiktet erläuterte das: „So ist zum Beispiel der Tod nichts Furchtbares … sondern nur die Meinung, er sei furchtbar, ist das Furchtbare.“ Dabei kannte Epiktet noch gar nicht die mittelalterlichen Bilder von der Hölle, die die Kirche ihren Gläubigen ausmalte.

In den letzten Jahren haben Neurowissenschaftler gezeigt, warum die Erkenntnis des Epiktet zutrifft. Wir schaffen uns eine Welt im Kopf. Wir können gar nicht anders, als uns ständig Bilder zu machen. Wir sind gezwungen, auch dann, wenn die Informationen, die wir von der Welt haben, unvollständig sind, uns daraus ein Bild zu zeichnen. Das war einst überlebenswichtig: Unsere Ahnen haben schwarze und gelbe Streifen im Gebüsch zum Bild eines Tigers zusammengesetzt und sind vorsichtshalber weggelaufen. Heute versuchen auf dieselbe Weise etwa Astrophysiker, sich aus ein paar Daten ein Bild zu machen, zum Beispiel, wie es in einem Schwarzen Loch aussieht (falls es Schwarze Löcher geben sollte).

Wir verwechseln allerdings ständig die Bilder, die wir uns machen – oder die wir übernehmen – und die unser Welt-Bild ausmachen, mit der Wirklichkeit. Die Bilder entfalten dann ein Eigenleben. So verhindert der gute – oder schlechte – Ruf, der jemandem vorauseilt, also das Bild von ihm, eine unvoreingenommene Einstellung. In einer vom Fernsehen bestimmten Gesellschaft ist für eine Politiker-Karriere entscheidend, wie der Mann oder die Frau „rüberkommt“, also nicht die Person, sondern ihr Bild in der Öffentlichkeit. Folgerichtig behauptet zum Beispiel der „Medienprofi“ Gerhard Schröder, das Beste, was ihm als Bundeskanzler im Wahlkampf passieren könne, sei, dass sein weniger medienbegabter Herausforderer Edmund Stoiber möglichst oft im Fernsehen auftrete.

Bereits der Ahne des *Homo sapiens*, genannt *Homo ergaster* (früher sprach man von *Homo erectus*), hatte die Fähigkeit, sich Bilder zu machen, vor anderthalb Millionen Jahren entwickelt. Die Innovation „Faustkeil“ verlangte nämlich erstmals, dass der Hersteller sich die Form seines künftigen Werkzeugs vorstellte – also bereits ein Bild davon hatte –, ehe er begann, sie aus dem großen Kiesel herauszuschlagen; im Prinzip nicht anders als Michelangelo, der vor vierhundert Jahren aus einem Marmorbrocken die Skulptur des David schuf.

Auch Worte sind Bilder, die Sprache ist eine Abstraktion von Bildern. Die Sprache einer Gemeinschaft bestimmt – auch in ihrer Beschränktheit – deren Weltbild. Wo die Worte fehlen, können auch bestimmte Aspekte der Wirklichkeit nicht abgebildet werden. Und umgekehrt: Bilder sprechen nicht an, wenn sie eine fremde Wirklichkeit abbilden. Als im frühen Mittelalter Missionare den Grönländern das Fegefeuer als postmortale Strafanstalt eindringlich schilderten, waren die Heiden begeistert von der Aussicht, nach dem Tode die kalte Heimat verlassen und in der warmen Hölle sitzen zu dürfen.

Wir verwechseln ständig unser Bild der Wirklichkeit mit der Wirklichkeit selbst

Die Mathematik ist ebenfalls eine Sprache, die etwas abbildet; eine Sprache, die sich im Laufe der Menschheitsgeschichte entwickelt hat und damit erst bestimmte Aspekte der Wirklichkeit zu sehen erlaubt. Kaiser Karl der Große beherrschte im 9. Jahrhundert ein Reich, das etwa so groß war wie die Europäische Union heute. In der damaligen globalen Wirtschaft gab es zwar längst schon das Geld, aber noch keinen Finanzminister, der mit Hilfe der doppelten Buchführung „Soll“ und „Haben“ im Kaiserreich hätte identifizieren können. Der Grund: Die Mathematik war noch nicht so weit entwickelt. Man kannte noch nicht den Unterschied von plus und minus. Ja selbst die Erfindung der Null hatte sich im Abendland noch nicht herumgesprochen. Die erste Quelle, die wir kennen, in der die Null in moderner Bedeutung vorkommt, ist eine Inschrift an einem Tempel im indischen Gwalior aus dem 8. Jahrhundert. Die Inder bauten das Symbol in ihre dezimale Schreibweise in unserem heutigen Sinne ein. Das indische System der Ziffern-Schreibweise übernahmen die Araber und brachten es mit dem Islam auch nach Europa. Im Abendland rechnete man mit der Null etwa seit dem 12. Jahrhundert.

Die Idee der Null stieß bei den vom scholastisch-theologischen Weltbild des Mittelalters Gebildeten zunächst auf heftige Ablehnung. Viele Menschen sahen in der Null ein Werk des Teufels, weil eine Null links neben einer Ziffer nichts bedeutet, rechts neben der gleichen Ziffer aber deren Wert verzehnfacht. Es ist eben unendlich schwer, immer zwischen Bild und Wirklichkeit zu unterscheiden, denn die Bilder machen sich selbständig und werden für die Wirklichkeit gehalten.

Die Physiker haben im 20. Jahrhundert mühsam gelernt, dass sie sich Bilder machen, die die Wirklichkeit nur in engen Grenzen genau beschreiben – wenn sie zum Beispiel glauben, eine richtig funktionierende Uhr gehe immer gleich schnell, oder „Gleichzeitigkeit“ sei eine absolut zu setzende Größe, unabhängig von einem Bezugssystem. Entsprechend haben sich die Welt-Bilder so stark geändert, dass sie jede Anschaulichkeit verloren haben, weil nun hochkomplizierte mathematische Formeln und nicht der Augenschein (beziehungsweise die Netzhaut) die Wirklichkeiten abbildet. Doch immer noch sind viele Menschen in einem vorkopernikanischen Weltbild ge-

fangen: Elf Prozent der über 16 Jahre alten Deutschen glauben nur, was sie sehen, nämlich dass die Sonne sich um die Erde dreht. Weitere sechs Prozent geben zu, es so genau nicht zu wissen, wie eine Allensbach-Umfrage im Frühjahr 2000 ergab.

Anders als in der Physik, wo die Bilder als vorläufig angesehen und ständig modifiziert werden, verhält es sich, wenn sich die Bilder selbstständig machen, ein Eigenleben entfalten und dann für die Wirklichkeit gehalten werden. So sprechen Christen aller Konfessionen heute von Gott dem Vater, dem Sohn und dem Heiligen Geist; einer „Trinität" – genau genommen unvorstellbar, aber man hatte ungefähr 1700 Jahre lang Zeit, sich an dieses Bild zu gewöhnen und nimmt es heute als eine Glaubensrealität. Zwei Jahrtausende lang haben Zehntausende von frommen Klerikern meditiert und nachgedacht. Sie entwickelten nicht, wie die Naturwissenschaftler, jeweils im Lichte neuer (experimentell nachprüfbarer) Erfahrungen neue Theorien. Ihr Werkzeug, die Heilige Schrift und deren Auslegungen, war immer dasselbe. Da muss man wohl auch zu absonderlichen Gedanken kommen.

Das kann im Übrigen auch Naturwissenschaftlern passieren, wenn sie Bild und Wirklichkeit verwechseln: Der amerikanische Physiker und Wissenschaftstheoretiker am Massachusetts Institute of Technology, Thomas Kuhn, hatte sich 1947, damals noch Student, im Rahmen einer Seminararbeit erstmals mit Aristoteles zu beschäftigen. Dieser war der Begründer der Logik und wird heute als der größte Gelehrte der Antike angesehen. Mit der Dreistigkeit des Newcomers urteilte Thomas Kuhn alsbald, „dass Aristoteles von den Gesetzmäßigkeiten der Mechanik praktisch keine Ahnung hatte", – ja, „dass Aristoteles nicht nur hinsichtlich der Mechanik versagt hatte, sondern überhaupt ein unglaublich schwacher Physiker gewesen sein musste". Kuhn meinte über Aristoteles' Werke, alles sei „voll von sagenhaften Irrtümern, und zwar logischen …".

Thomas Kuhn, später ein hochangesehener Wissenschaftler, bemerkte bald, warum er zu so krasser Fehleinschätzung gekommen war. Aristoteles hatte andere Bilder. Er verwendete die auch heute bei Physikern gebräuchlichen Begriffe, etwa das Konzept von „Bewegung", in einem viel umfassenderen Sinn als später etwa Galileo Galilei oder Isaac Newton. Kuhn hat aus seinen Erfahrungen mit Aristoteles, den er zunächst so entsetzlich falsch verstanden hatte, grundsätzliche Erkenntnisse gewonnen.

„Wissenschaftliche Revolutionen" entstehen, wie Kuhn entdeckte, so, dass sich in ihnen das mit der Sprache als solcher – auch schon der alltäglichen – unabdingbar verbundene Wissen über die Natur verändert. Vor einer solchen Revolution stand jeweils „die Sprache der Entdeckung und Verbreitung der gesuchten neuen Theorien im Wege". Voraussetzung für jeden wissenschaftlichen Fortschritt ist, dass man sich der Begrenztheit durch die Bilderwelt, in der man befangen ist, bewusst wird. Denn sonst kann aus einem wissenschaftlichen (wie jedem anderen) Welt-Bild Aberglauben werden. Auch dafür ein Beispiel:

Im Jahre 1857 begann der Augustinermönch Johann „Gregor" Mendel im Klostergarten von Brünn Erbsen anzupflanzen. Was er nach acht Jahren entdeckt hatte, war buchstäblich weltbewegend, obgleich es zunächst nicht danach aussah: Wenn der Mönch sortenreine großwüchsige und zwergwüchsige Erbsen miteinander kreuzte, brachten sämtliche daraus entstehenden Samen großwüchsige Pflanzen hervor. Die Eigenschaft „Kleinwüchsigkeit" schien verschwunden. Wenn Mendel nun die Bastard-Pflanzen jeweils mit sich selbst befruchtete, war auf einmal alles anders: Ein Viertel der Samen entwickelte sortenreine Zwergpflanzen, ein weiteres Viertel sortenreine großwüchsige Erbsen und die Hälfte waren großwüchsige, nicht sortenreine Erbsenpflanzen. Der Mönch und spätere Abt von Brünn, ein Studienversager und eben mal bloß „Erbsenzähler", hatte entdeckt, was wir heute die Mendel'schen Gesetze der Vererbung nennen.

Die Biologen haben das Bild von Mendels Erbsen auf fatale Weise verinnerlicht

Die Biologen verinnerlichten das Bild aus dem Erbsen-Garten – auf fatale Weise. Auf der internationalen Hygieneausstellung in Dresden anno 1911 wurden analog zu den Bildern von Gregor Mendel Tabellen ganz anderer Art aufgestellt: Die Tochter eines „Verbrechers" hat zwei Söhne, der eine wird ein normaler Pfarrer, der andere ein „Sonderling, tüchtiger Kaufmann, sehr eigensinnig". Von dessen fünf Kindern ist ein Mädchen „normal", zwei Jungen sind „geisteskrank", der andere „sehr intelligent, Tyrann, Psychopath, hat es als Kaufmann weit gebracht, an der Grenze des Zuchthauses gestreift, jetzt Dementia senilis". Jener „normale Pfarrer" heiratete eine Frau mit „Defekt des Taktgefühls". Von den acht aus dieser Ehe hervorgehenden Kindern wurde einem Jungen „moralische Idiotie" attestiert.

Man könnte heute darüber lachen, wenn es die Genetiker der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts nicht so blutig ernst gemeint hätten. Denn diese Herren Anthropologen oder „Rassenhygieniker", wie sie sich auch nannten, bekamen in der Zeit des Nationalsozialismus die Macht, ihre akademischen Vorstellungen auszuleben, Stichwort Euthanasie. Die menschliche Rasse, so glaubten sie, verhalte sich wie die Erbsen in Mendels Garten. Es machte also keinen Unterschied, ob eine Blüte blau oder rot ist, oder ein Mensch Trinker oder tuberkulosekrank, oder schwarz oder blond.

Das Erbsenbild entfaltete ein unrühmliches Eigenleben: Schlechte Anlagen kann und muss man ausrotten, wie die Zwergwüchsigkeit der Erbse, indem man die Träger solcher Anlagen mindestens sterilisiert, sodass sie sich nicht mehr vermehren können. Die Wahnvorstellungen der Medizin in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts waren zunächst weltweit verbreitet. Spezifisch deutsch war dann das Bild von der „Höherwertigkeit" der weißen Rasse und der „Minderwertigkeit" aller anderen, vor allem aber der Juden.

Man sieht, die Erkenntnis des Epiktet ist bis heute aktuell geblieben. Wir machen uns Bilder und inszenieren uns und die Welt ständig neu. Dies zu wissen, ändert nichts daran, denn, wie gesagt, so funktioniert unser Gehirn. Die größten künstlerischen und intellektuellen Leistungen des Menschen beruhen darauf, dass er sich Bilder macht. Aber er ist auch verführbar von den Bildern, die sein Welt-Bild ausmachen, wenn diese sich selbständig machen und zu Ideologien werden. Entmythologisierung und Aufklärung sind deshalb notwendige und niemals endende Prozesse im individuellen und gesellschaftlichen Leben wie in der Wissenschaft.

Martin Urban *ist Ressortleiter Wissenschaft der Süddeutschen Zeitung. Sein Buch „Wie die Welt im Kopf entsteht – Von der Kunst, sich eine Illusion zu machen" ist soeben im Verlag Eichborn, Berlin, erschienen.*


ANDREAS HEDDERGOTT

(Seiten 108, 109 und 110: Anzeige und Beihefter)

LAUFROBOTER „MOONWALKER-II“



Nach dem Zusammenbauen und Einsetzen einer Batterie können Sie „Moon-Walker II“ losmarschieren lassen. Sein „elektronisches Gehirn“ ist mit zwei Sensoren ausgestattet, die auf Licht und Geräusche reagieren. Maße 13 × 10 cm; € 48,–.

BECHERSET „BALANCE“





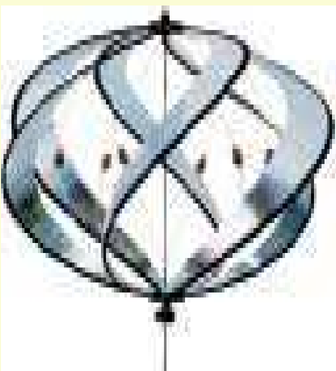
Schräg liegt sie da, die Halbkugel aus schwerem Edelstahl – bis sie mit Wasser gefüllt wird. Dann richtet sich der wohlgeformte Blickfang wie von Zauberhand in die Waagerechte. Aber natürlich ist hier keine Magie im Spiel, sondern schlichte Physik. Denn mit steigendem Wasserstand verlagert die raffiniert gearbeitete Form ihren Schwerpunkt; € 40,–.

BLECHSCHILD „KAMEL“

Das Motiv dieses nostalgischen Blechschilds war im Jahr 1959 Titelbild von Scientific American. Format 30 × 40 cm; Stahlblech ca. 0,5 mm dick, gewölbte Ausführung; € 35,–.

WINDSPIEL „GALAXY“

Ein wunderschönes Windspiel mit holografischen Effekten für den Garten. Wetterfest; Durchmesser 37 cm; Höhe mit Befestigungsstab 115 cm; € 30,-.



JUNIOR WISSEN

ZAPP ZERAPP



In 13 kleinen Fässern werden Steine versteckt. Durch Schütteln versucht man die Anzahl der Steine zu erraten. Nur die „gehörstarken” Mitspieler kommen in die nächste Spielphase. Das Spiel gehört zu den besten drei Gesellschaftsspielen des Jahres 2001. Ein magisches Schüttelvergnügen für die ganze Familie (2- 4 Spieler ab 7 Jahren); € 29,50.

SPIEL „PLANETARIUM“

Die Planeten (Magnetkugeln) werden durch Karten den Spielern zugeordnet. Wem es gelingt, seine Planeten als Erster zweimal um die Sonne zu führen, ist Sieger. Allerdings aufgepasst! Der Komet kann einen Planeten zerstören; € 29,50.



ELECTRONIC XN 2000



Der Experimentierkasten von Kosmos bietet ein wahres Feuerwerk an elektronischen Effekten und Möglichkeiten. Von der Jagd auf Elektronik-Läuse über Schlangenbeschwörungsapparate bis hin zu Klatschometer, Lügendetektor und vieles mehr reicht das Spektrum elektronischer Zaubereien. Der anwendungsorientierte Elektronik-Grundkurs eignet sich für Kinder ab 11 Jahren; € 98,–.

MAGICAL STRINGS

Um die in einer Klavierfabrik gebaute „Zither“ zu spielen, sind keine Vorkenntnisse erforderlich. Einfach die mitgelieferten Noten unter die Saiten legen und mit den Fingern oder einem Plektrum spielen. In angenehmer Lautstärke ertönen dann die Lieder oder selbst komponierten Melodien; € 34,90.

Beihefter

Beihefter

VRML: die verschmähte virtuelle Welt

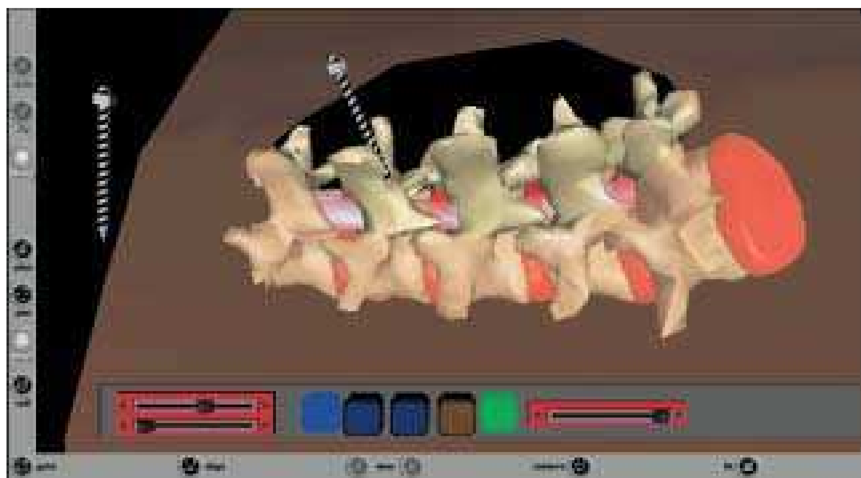
Der Bildschirm zeigt das Modell eines organischen Moleküls, vom schlichten Alkohol über THC, den Wirkstoff des Haschischs, bis hin zu weniger berauschenden, dafür umso schwerer vorstellbaren Dingen wie ganzen Proteinmolekülen in natürlich gefalteter Konformation. Wie die alten Modelle aus dem Chemieunterricht bestehen die Computerdarstellungen aus Kugeln und Stäbchen oder aus dicht an dicht gepackten Kalotten (Kugelschalen); und wie ihre verstaubten Vorbilder sind sie anfassbar – fast. Man langt mit dem Mauszeiger in das Bild, drückt den Knopf, und schon rotiert das Molekül so, wie der Betrachter die Maus führt, und gestattet ihm Blicke von allen Seiten.

Das ist hübsch und sehr instruktiv; deswegen haben viele Institute für Chemie und Chemiedidaktik von diesem Darstellungsmittel Gebrauch gemacht und Molekülmodelle ins Netz gestellt. http://www.uni-koeln.de/ew-fak/Chemie/VRML_index.htm und http://www.nyu.edu/pages/mathmol/library/ bieten zahlreiche Beispiele und Verweise auf weitere Websites.

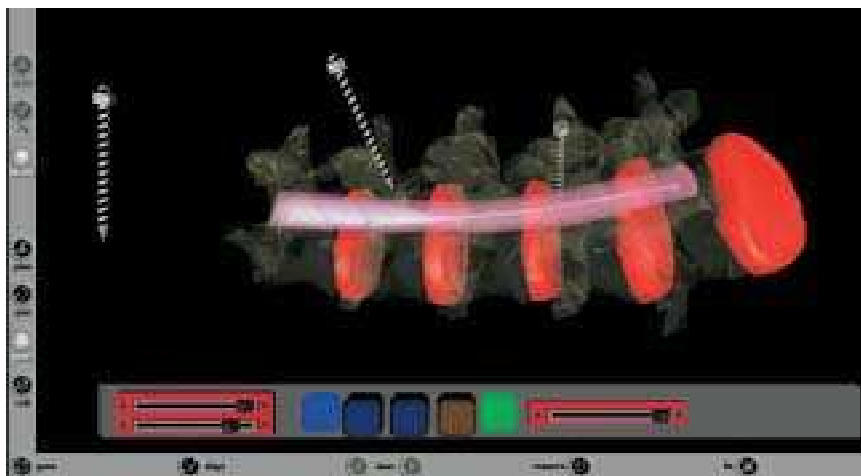
Hinter den Darstellungen steckt eine Beschreibungssprache namens VRML (*virtual reality modeling language*). Eine VRML-Datei enthält abstrakte, dreidimensionale Beschreibungen der in ihr enthaltenen Objekte; erst im Computer des Benutzers errechnet daraus ein Darstellungsprogramm (Browser) die Ansicht, die sich vom – veränderlichen – Standpunkt des virtuellen Betrachters aus darbietet.

Die offizielle Sprachdefinition (http://www.web3d.org/fs_specifications.htm) zeigt, dass VRML darüber hinaus noch weit mehr kann. Die äußerst mächtige Sprache erlaubt die Definition von Gegenständen mit einer Fülle von Eigenschaften. Die virtuelle Verkörperung des Benutzers (sein „Avatar“) darf sich durch die Welt bewegen. Standard-Bewegungsformen wie Gehen über unebenen Untergrund oder Fliegen durch den Weltraum sind bereits vorprogrammiert. Durch Berühren gewisser Objekte, oder indem sie in sein Blickfeld geraten, löst der Avatar Ereignisse aus; auf einen Auslöser hin, oder auch nur durch den Ablauf der Zeit, ändern die Dinge der virtuellen Welt ihre Eigenschaften.

Wenn die Ladezeiten nicht so lang würden, könnte man in VRML ein komplettes Videospiel programmieren. Oder auch eine Art psychedelisches Kino: Lassen Sie sich von den nichteuklidischen Kaleidoskopen von Vladimir Bulatov berauschen (http://www.physics.orst.edu/~bulatov/vrml), oder betrachten Sie von allen Seiten die verrückten Polyeder von Jim McNeill (http://web.ukonline.co.uk/polyhedra/)! Nicht umsonst tragen VRML-Dateien das kennzeichnende Anhängsel .wrl wie „world“, und ihre Autoren heißen „Schöpfer“ (*creator*) im üblichen Jargon.



Training für Chirurgen: Eine VRML-Welt des Visualisation Centre der University of Manchester enthält neben einer virtuellen, teilweise freigelegten Wirbelsäule drei Schrauben, die der Benutzer ansetzt (blaue Knöpfe), ausrichtet (brauner Knopf) und eindreht (grüner Knopf mit Schieberegler). Dabei kann er sein Objekt beliebig ins Blickfeld drehen und am Ende Knochen und umgebendes Gewebe transparent machen (unten), um nachzusehen, ob er eine Schraube ins Rückenmark gedreht hat.



Hinter der schönen Theorie bleibt die Realität kläglich zurück. Der Nutzer muss viel Geduld mitbringen und darf sich durch häufige Programmabstürze nicht irritieren lassen. Vor ungefähr vier Jahren hat das Interesse an VRML so nachgelassen, dass die Weiterentwicklung der zahlreichen Browser stehen geblieben ist. Darunter litt offensichtlich die Motivation der Schöpfer.

Von den heroischen Anstrengungen einiger VRML-Unentwegter ist wenig übrig geblieben; aus der langen Liste von Bob Crispen (http://hiwaay.net/~crispen/vrml/worlds.html) existieren die meisten Links inzwischen nicht mehr. Nützliche Anwendungen wie die virtuelle Chirurgenschulung (http://synaptic.mvc.mcc.ac.uk/PedicleScrew.html; Bilder) sind Ausnahmen; nur allzu häufig hampelt der Benutzer in virtuellen Museumsrundgängen wie http://www.leonardodicaprio.com/lcl_img/art/3DGAL/3dgal.wrl hilflos um Bilder herum, die platt von vorne noch am besten wirken würden.

Schade um ein gutes Konzept.

Christoph Pöppe

Science and Fun

LAUFROBOTER „MOONWALKER-II“



Nach dem Zusammenbauen und Einsetzen einer Batterie können Sie „Moon-Walker II“ losmarschieren lassen. Sein „elektronisches Gehirn“ ist mit zwei Sensoren ausgestattet, die auf Licht und Geräusche reagieren. Maße 13 × 10 cm; € 48,–.

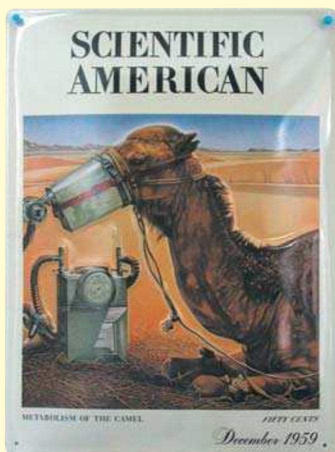
BECHERSET „BALANCE“





Schräg liegt sie da, die Halbkugel aus schwerem Edelstahl – bis sie mit Wasser gefüllt wird. Dann richtet sich der wohlgeformte Blickfang wie von Zauberhand in die Waagerechte. Aber natürlich ist hier keine Magie im Spiel, sondern schlichte Physik. Denn mit steigendem Wasserstand verlagert die raffiniert gearbeitete Form ihren Schwerpunkt; € 40,–.

BLECHSCHILD „KAMEL“



Das Motiv dieses nostalgischen Blechschilds war im Jahr 1959 Titelbild von Scientific American. Format 30 × 40 cm; Stahlblech ca. 0,5 mm dick, gewölbte Ausführung; € 35,–.

WINDSPIEL „GALAXY“

Ein wunderschönes Windspiel mit holografischen Effekten für den Garten. Wetterfest; Durchmesser 37 cm; Höhe mit Befestigungsstab 115 cm; € 30,-.



JUNIOR WISSEN

ZAPP ZERAPP



In 13 kleinen Fässern werden Steine versteckt. Durch Schütteln versucht man die Anzahl der Steine zu erraten. Nur die „gehörstarken" Mitspieler kommen in die nächste Spielphase. Das Spiel gehört zu den besten drei Gesellschaftsspielen des Jahres 2001. Ein magisches Schüttelvergnügen für die ganze Familie (2-4 Spieler ab 7 Jahren); € 29,50.

ELECTRONIC XN 2000



Der Experimentierkasten von Kosmos bietet ein wahres Feuerwerk an elektronischen Effekten und Möglichkeiten. Von der Jagd auf Elektronik-Läuse über Schlangenbeschwörungsapparate bis hin zu Klatschometer, Lügendetektor und vieles mehr reicht das Spektrum elektronischer Zaubereien. Der anwendungsorientierte Elektronik-Grundkurs eignet sich für Kinder ab 11 Jahren; € 98,–.

SPIEL „PLANETARIUM“

Die Planeten (Magnetkugeln) werden durch Karten den Spielern zugeordnet. Wem es gelingt, seine Planeten als Erster zweimal um die Sonne zu führen, ist Sieger. Allerdings aufgepasst! Der Komet kann einen Planeten zerstören; € 29,50.



MAGICAL STRINGS

Um die in einer Klavierfabrik gebaute „Zither“ zu spielen, sind keine Vorkenntnisse erforderlich. Einfach die mitgelieferten Noten unter die Saiten legen und mit den Fingern oder einem Plektrum spielen. In angenehmer Lautstärke ertönen dann die Lieder oder selbst komponierten Melodien; € 34,90.





Ein umwerfendes Experiment

Kann man mit einer Pendelkugel eine Flasche umwerfen? Ohne Zweifel. Kann man es auch hinterrücks tun? Im Prinzip ja – allerdings nur mit einem faulen Trick.

VON WOLFGANG BÜRGER

GRAFIK: AXEL WEIGEND

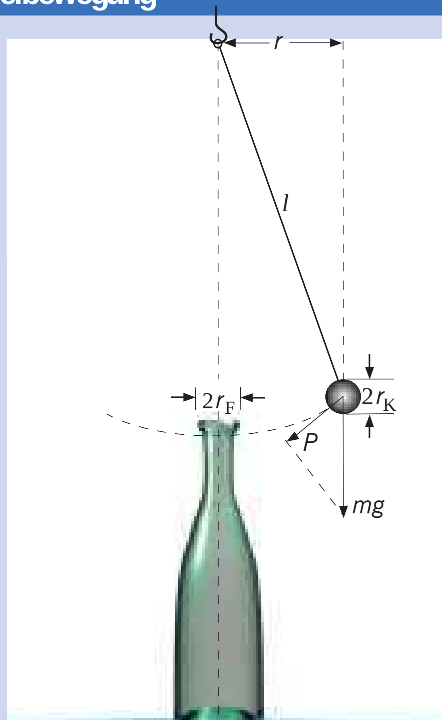
Physikalisches Wettspiel: Als Spielführer betreuten wir zwei gegnerische Mannschaften, sechs ausgewählte Schüler aus den obersten Klassen einer Oberschule gegen sechs ihrer Lehrer, die den Mut hatten, vor aller Öffentlichkeit gegen ihre jungen „Cracks" in den Naturwissenschaften anzutreten – wohlverstanden nicht die Mathematik- oder Physiklehrer, sondern Vertreter anderer Fächer wie Deutsch, Erdkunde oder Musik. Für beide Mannschaften hatten wir den gleichen Versuchsaufbau vorbereitet: Eine schwere Eisenkugel hing an einer gut zwei Meter langen Schnur von oben herab. Genau senkrecht unter die Deckenhaken stellten wir zu Beginn je eine leere Weinflasche. Mit Bedacht hatten wir die Schnur ein paar Zentimeter länger gemacht, als der Abstand von der Decke zum Flaschenhals betrug, und mussten deshalb, um der Flasche Platz zu machen, das Pendel aus seiner senkrechten Ruhelage auslenken. In solcher Lage aus der ruhenden Hand entlassen, sollte das Pendel bei der ersten Gelegenheit die Flasche umstoßen. Dass das möglich war, konnte jeder einsehen, ohne den Versuch zu machen. Wir stellten eine schwierigere Aufgabe: „Startet euer Pendel so", verlangten wir von den Mannschaften, „dass die Kugel auf dem Hinweg glatt an der Flasche vorbeigeht, sie aber auf dem Rückweg umstößt!"

Experimente: Eifrig reihten beide Mannschaften Versuch an Versuch. Wir hatten in der Nähe der Pendel vorsorglich Mikrofone aufgestellt, damit wir selbst und die Zuschauer die internen Diskussionen verfolgen konnten. So erfuhren wir, dass sich beide Lager sehr rasch über das Problem im Klaren waren: Der Rückweg der Kugel war ein symmetrisches Bild des Hinwegs. Wenn sie auf einem Weg das Zentrum mied, dann auch auf

Die lästige Symmetrie der Pendelbewegung

Drehimpuls: Für unsere Zwecke genügt es, anstelle der vollständigen Bewegung der Pendelkugel nur die ihrer Projektion auf eine waagerechte Ebene zu betrachten. Das ist der Schatten, den die Kugel bei parallelem, von oben kommendem Licht auf den Boden wirft. Legen wir in dieser Ebene den Nullpunkt unseres Koordinatensystems in den Gleichgewichtspunkt des Pendels (genauer: den Schatten dieses Punktes). Die Bewegung des Pendelschattens ist dieselbe wie die eines Massenpunktes in der Ebene unter einer anziehenden Kraft, die stets auf den Nullpunkt zu gerichtet ist. Bei solchen Bewegungen bleibt der Drehimpuls $D = mr^2\dot{\varphi}$ (m Pendelmasse, r Abstand vom Nullpunkt, $\dot{\varphi}$ Winkelgeschwindigkeit) unverändert.

Bei kleinen Auslenkungen zerfällt die Bewegung des Pendels in zwei unabhängige, um 90° phasenverschobene Schwingungen in Richtung der Koordinaten x und y mit der von



THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

der Pendellänge ℓ abhängigen Kreisfrequenz $\omega = \sqrt{g/\ell}$ (g Schwerebeschleunigung). Es ergibt sich eine Ellipse mit Mittelpunkt im Nullpunkt. Anders als bei der Kepler'schen Planetenbewegung liegt das Kraftzentrum nicht in einem Brennpunkt, sondern im Mittelpunkt der Ellipse.

Der Bequemlichkeit zuliebe starten wir die Kugel an einem der vier Scheitel der Ellipse, im Abstand a (große Halbachse) vom Zentrum, in tangentialer Richtung mit der Geschwindigkeit v_a. (Jede andere Anfangsbedingung lässt sich, mit etwas Rechenarbeit, auf diesen Fall zurückführen.) Dann folgt ihre Bewegung den beiden Gleichungen

$$x = b \sin \omega t$$
$$y = -a \cos \omega t \;;$$

aus den Anfangsbedingungen ergibt sich $b = v_a/\omega = v_a\sqrt{\ell/g}$. Der Schatten der Kugel zeichnet die Ellipse mit der Gleichung $x^2/b^2 + y^2/a^2 = 1$

dem anderen. Während der kurzen Bedenkzeit suchten daher beide Mannschaften fieberhaft nach einem physikalischen Effekt, der die Symmetrie der Bewegung stören konnte.

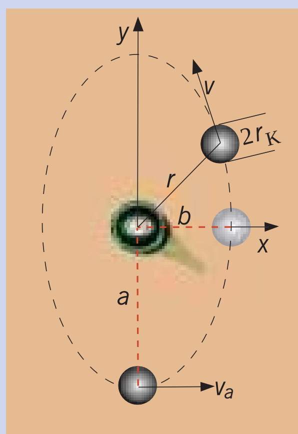
Erster Kandidat ist der Luftwiderstand der Kugel und der Schnur, der zweifellos die Bewegung des Pendels bremst. Für lange Laufzeiten, zum Beispiel eines Foucault-Pendels, ist auch die Reibung im Lager der Schnur nicht zu vernachlässigen. Ein nur sich selbst überlassenes Schwerependel kommt deshalb früher oder später zur Ruhe. Könnte die Luftreibung eine Kugel, die man auf dem Hinweg sehr knapp an der Flasche vorbei steuerte, bis zur Rückkehr schon so weit abgebremst haben, dass sie die Flasche vielleicht nur leicht streifte, aber trotzdem umwürfe? Um diese Möglichkeit von vornherein auszuschließen, hatten wir schwere Pendelkugeln ausgesucht, die im Verlaufe einer einzigen Schwingung nicht merklich an Schwung nachließen. Die Mannschaften bemühten sich einige Zeit vergeblich, das Pendel ganz nahe an der Flasche vorbeizudirigieren, stießen sie aber, wenn überhaupt, schon auf dem Hinweg um. Hätten wir leichte Styropor- statt gewichtiger Eisenkugeln genommen, wären sie wohl mit etwas Geschick zum Erfolg gekommen. Unter den gegebenen Bedingungen konnte der Luftwiderstand aber nicht die Lösung sein.

Die zweite Hoffnung der Mannschaften war der Magnus-Effekt. Was lag den Tennisspielern unter unseren „Forschern" näher, als die Kugel mit Effet zu starten, das heißt, sie so in Drehung zu versetzen, dass aerodynamischer „Auftrieb" sie quer zur Flugrichtung beschleunigte? Beim Golfspiel wird durch Effet um eine horizontale Achse quer zur Bahn der Flugweg des Balles spielentscheidend verlängert (Spektrum der Wissenschaft 9/2001, S. 58), beim Tennis oder Tischtennis dient Effet vor allem dazu, den Weg des Balles abzufälschen, um den Gegner zu täuschen. In unserem Spiel induziert die Drehung der fliegenden Kugel um die Richtung ihrer Pendelschnur in der Luft eine „Auftriebskraft", die je nach Drehsinn nach innen, also auf die Flasche zu, oder nach außen gerichtet ist. Man überlegt schnell, dass die Magnuskraft die Kugel zur Flasche treibt, wenn die Kugel im gleichen Sinne rotiert, in dem sie die Flasche umrundet. Die Mannschaft, die den Effet für sich entdeckt hatte, begann eilig die Schnur mit der Kugel zu verwinden in der Hoffnung, die Schnur werde beim Auf- ▶



Die Kugel haarscharf an der Flasche vorbeischwingen zu lassen, verlangt erhebliches Fingerspitzengefühl. Aber selbst das hilft nicht …

nach. Soll es der Kugel mit Hilfe der Luft gelingen, auf dem Hinweg an der Flasche vorbeizukommen und sie auf dem Rückweg umzustoßen, muss der geringste Abstand b des Pendels vom Zentrum auf dem Hinweg geringfügig größer und auf dem Rückweg geringfügig kleiner sein als die Summe d der Radien von Pendelkugel und Flaschenhals: $d = r_K + r_F$.



Damit Reibungskräfte auf dem kurzen Weg zwischen den beiden Begegnungen die Größe b merklich mindern können, wird man eine möglichst schmale Ellipse fahren ($b \ll a$). Man macht a möglichst groß und v_a nur wenig größer als die Minimalgeschwindigkeit $(v_a)_{\min} = \omega d$, mit der die Kugel auf dem Hinweg gerade noch an der Flasche vorbeikommt. Für $\ell = 2$ m, $g = 10\,\mathrm{m/s^2}$, r_F =1,5 cm und $r_K = 4$ cm beträgt diese Minimalgeschwindigkeit etwa 12,3 cm/s oder 0,44 km/h, ein Wert, der nicht einfach zu treffen ist. Viel Vergnügen beim Probieren!

Luftwiderstand: Vergleichen wir die beiden beteiligten Kräfte: Die Luftwiderstandskraft ist $W = c_w A \rho_L v^2/2$; dabei ist $c_w < 0,5$ der Widerstandsbeiwert und $A = \pi r_K^2$ die Querschnittsfläche, die die Pendelkugel in den Wind stellt (ρ_L Luftdichte, v Geschwindigkeit, r_K Kugelradius). Die Rückstellkraft, die das Pendel auf den Mittelpunkt hin zieht, ist $P = mgr/\ell$ $(m = (4/3)\pi r_K^3 \rho_k$ ist die Kugelmasse, ρ_k die Dichte des Kugelmaterials). Die vorsichtige Abschätzung des Verhältnisses W/P für die Bewegung der Pendelkugel auf einer schlanken Bahnellipse liefert einen Wert deutlich kleiner als 0,01. Der Luftwiderstand kann die gestellte Aufgabe also kaum lösen.

Magnus-Effekt: die letzte Hoffnung! Eine Kugel, die sich mit der Bahngeschwindigkeit $\vec{v}$ bewegt, erfährt infolge einer Eigenrotation mit der Winkelgeschwindigkeit Ω durch Reibung an der Luft eine Auftriebskraft L, die senkrecht auf dem Vektor $\vec{v}$ und der Achse der Eigenrotation steht und sich in ähnlicher Weise darstellen lässt wie der Widerstand W, wenn man den Widerstandskoeffizienten c_w durch einen Auftriebskoeffizienten c_L ersetzt. Für dessen Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis $v/(r_K\Omega)$ gibt es aus der Mechanik des Tennisspiels empirische Näherungsformeln, die zu diskutieren hier zu weit führen würde. Bei den erreichbaren Ω ist die Magnuskraft aber noch kleiner als der Widerstand und löst die gestellte Aufgabe ebenso wenig.

drehen die Kugel in rasche Drehung versetzen. Das gelang ihr recht gut, und auch die theoretische Überlegung, auf die sie sich gründete, war richtig. Leider war ihr praktisch kein Erfolg beschieden, weil die Magnuskraft, gemessen an der Rückstellkraft des Pendels (der zur Schnur senkrechten Komponente ihres Gewichts), unter den im Versuch erreichbaren Geschwindigkeiten viel zu schwach war. Wirklich schade! Die Bedenkzeit war leider um, und die Spielführer hatten nun ihre Erklärung zu geben.

Theorie des Schwerependels: Wie lässt sich einsehen, dass die Pendelkugel, einmal an der Flasche vorbei geschickt, fortan die Flasche meidet wie die Katze den heißen Brei, vorausgesetzt, dass keine weiteren Kräfte (wie Luftwiderstand oder Magnuseffekt) Einfluss auf die Bewegung nehmen? Ein in einem Punkt aufgehängtes Schwerependel kann nicht nur in einer vertikalen Ebene schwingen, sondern auch, während die Kugel auf einem horizontalen Kreis umläuft, mit der Schnur einen senkrechten Kreiskegel in den Raum zeichnen – die zwei typischen Bewegungen eines Kugelpendels, aus denen sich alle anderen denkbaren Bewegungen zusammensetzen lassen. Solange die Reibung keinen Einfluss hat, bleiben gewisse Eigenschaften der Bewegung zeitlich konstant und charakterisieren sie weit gehend: für die ebene Pendelschwingung die Energie, die Summe von Bewegungsenergie und Lageenergie der Kugel im Schwerefeld, und für die Kegelbewegung auch der Drehimpuls um die senkrechte Achse durch den Aufhängepunkt. Wer die Kugel auf dem Hinweg an der Flasche vorbei schicken will, muss ihr einen angemessenen Drehimpuls auf die Reise mitgeben. Der aber hindert sie auf dem Rückweg daran, sich der Flasche in unfreundlicher Absicht zu nähern. Die Ruhelage im Zentrum ist für das Pendel mit Drehimpuls unerreichbar.

Ein fauler Trick: Mit Physik kommt man nicht zum Ziel – so scheint es. Die gestellte Aufgabe lässt sich aber mit einem Trick lösen. Den haben wir den Mannschaften vorgeführt und böse Beschimpfungen geerntet. Eine etwas dickere Schnur verkürzt sich beim Verdrillen. Wir verdrillten die Schnur so weit, dass das Pendel bei der Schwingung durch die Mittelebene auf dem Hinweg gerade noch über die Flasche schwebte. Bis zur Rückkehr hatte sich die Schnur so weit aufgedreht, dass die Kugel die Flasche umwarf. Wie ich schon erzählte, fing eine der Mannschaften beim Spiel an, die Schnur zu verdrillen, allerdings um von deren elastischer Rückstellkraft Gebrauch zu machen. Einen Augenblick lang dachten wir schon, sie wäre auf den Trichter gekommen. Aber die Jugend hatte weniger Hintergedanken als wir. ■

PREISRÄTSEL

Schäfchen zählen

Quelle unbekannt; mitgeteilt von Wolfgang Leitner

Bauer Jan und seine Schwester Jana erbten von einer Tante eine Herde Schafe. Da Jan um seine Äcker fürchtete, verkauften sie alle Tiere und bekamen für jedes Schaf genauso viel Euro, wie Schafe in der Herde waren. Ausbezahlt wurde das Geld in Zehn-Euro-Scheinen und Ein-Euro-Münzen. Sie legten nun den ganzen Geldhaufen auf den Tisch und nahmen sich immer abwechselnd einen Schein, bis keiner mehr übrig war.

„Das ist nicht fair!“, beschwerte sich Jana. „Du hast den ersten und den letzten Schein genommen. Also hast du jetzt zehn Euro mehr als ich.“

Daraufhin gab Jan seiner Schwester alle Münzen. Die war damit immer noch nicht zufrieden: „Du hast mir weniger als zehn Euro gegeben. Du schuldest mir also noch Geld.“

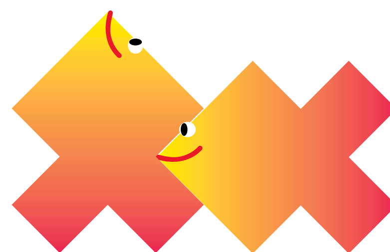
„Stimmt“, sagte Jan. „Ich schreibe dir einen Scheck aus, sodass wir am Schluss die gleiche Summe bekommen haben.“

Welchen Betrag schrieb Jan auf den Scheck?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Blechschilder „Kamel“. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 16. April 2002, eingehen.

Lösung zu „Zickzack“ (Februar 2002)



Magnus Rummey aus Augsburg interpretierte die gesuchten kongruenten Teile der Figur als Goldfische.

Die Gewinner der fünf Jahrbücher „Ahnerts Astron“ sind Magnus Rummey, Augsburg; Bettina Müller, Sehmatal; Helmut Wolf, Bonn; Johanna Letschert, Sinn; und Lilian Matthiesen, Reinbek.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik“ jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Zahnpasta

Schon in der Antike war das Zähneputzen gebräuchlich. Griechen und Römer nutzten Bimsstein, Knochenmehl und Austern- oder Eierschalen zur mechanischen Reinigung, dazu Myrre oder andere Stoffe mit adstringierender Wirkung, um eventuelle Blutungen zu stillen. Die heutige Zahnpasta enthält nach wie vor solche Grundkomponenten, dazu noch chemische Reinigungsmittel sowie therapeutische Stoffe, um Zähne und Zahnfleisch gesund zu erhalten.

Schleifstoffe bilden die Hauptbestandteile von Zahnpasta. Meist sind es hydratisierte Kieselerdepartikel mit einem Durchmesser von vier bis zwölf Mikrometern. Substanzen wie Kalziumkarbonat, Dikalziumphosphat und Aluminiumoxid-Trihydrat ergänzen das Spektrum der „Schmirgelteilchen“. Der Grad der Schleifwirkung ist von entscheidender Bedeutung: Die Zahnpasta soll Zahnstein und Plaque entfernen, jedoch ohne die Zahnoberfläche zu beschädigen.

Reinigungsmittel (Detergenzien), üblicherweise Natriumlaurylsulfat, erzeugen den Schaum. Sie lösen dabei Speisereste und andere Abfallstoffe, außerdem verteilen sich die Schleifstoffe so leichter.

Therapeutische Wirkstoffe wie Fluorid sollen Zähne und weiches Mundgewebe gesund erhalten. Zahnpasta enthält in der Regel drei Fluoridverbindungen zur Bekämpfung der Karies: Natriumfluorid, Natriummonofluorphosphat und Zinn(II)-Fluorid. Der Zahnschmelz wird durch die von Bakterien im Mund gebildete Säure zersetzt, aber mit Fluorid kann man diesem Prozess entgegenwirken. Speichel dient als Reservoir für Kalzium und Phosphat, die zusammen mit Fluorid den Zahnschmelz remineralisieren (siehe unten).

*Der Autor **Kenneth H. Burrell** ist Mitglied der American Dental Association.*

Schleifmittel

Reinigungsmittel

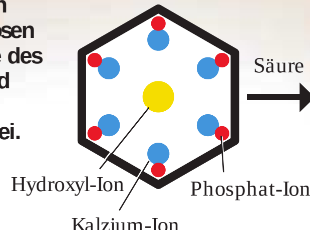
Speisereste

durch Karies entstandener Hohlraum

GEORGE RETSECK

Hydroxyapatit-Kristall

❶ Die von Mundbakterien produzierten Säuren lösen Hydroxyapatit-Kristalle des Zahnschmelzes auf und setzen dabei Kalzium- und Phosphat-Ionen frei.



Säure

Fluorid

Fluorapatit-Kristall

Fluorid

❷ In Gegenwart von Fluorid und Speichel bilden die Ionen einen durch Fluorapatit remineralisierten Zahnschmelz, der weiteren Angriffen widersteht.

BRYAN CHRISTIE

Der Ätna als Pulverfass

Europas aktivster Vulkan verhielt sich trotz spektakulärer Ausbrüche bisher relativ gutartig. Doch nun offenbart er einen Trend zu tückischerem Verhalten: Statt eher harmlose Lavaströme auszustoßen, könnte er bei verheerenden Explosionen Teile des Gipfels wegsprengen.

Weitere Themen im Mai

Die Droge Fernsehen

Wer immerzu in die Röhre guckt, erfüllt die Kriterien eines Suchtkranken. Darum fällt Fernsehsüchtigen auch die Entwöhnung so schwer.

Elektronisches Papier

Mehrere Firmen entwickeln eine biegsame Folie, die als elektronischer Bildschirm funktioniert und Schriftzeichen so flimmerfrei wiedergibt wie bedrucktes Papier.

Kogge im Tank

Fast zwanzig Jahre verbrachte das Wrack einer mittelalterlichen Hanse-Kogge im Konservierungstank. Dank moderner Chemie scheint das Schiff jetzt präpariert für die Zukunft.



Unfallfreies Fahren

Der Mensch lenkt, sein Auto denkt mit. Maschinenintelligenz im Verein mit Sensoren, kurz „Fahrerassistenzsysteme“, sollen Unfallrisiken drastisch minimieren.



Kosmische Hintergrundstrahlung

Eine genaue Analyse der diffusen Röntgenstrahlung am Himmel ermöglicht den Astronomen, in den Weiten des Alls neue Klassen von Galaxien zu entdecken.